

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГУСЕНИЧНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Артемиев А.В., Зябкин Г.В., Кутузов А.М., Носков М.С., Смирнов Я.Н.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ходовая часть, подвеска, движитель, система поддрессоривания, робототехническая платформа, торсион.

Аннотация. Разработка мобильных гусеничных робототехнических платформ является актуальной и востребованной задачей. В настоящее время подобные платформы активно используются и испытываются в сельском и лесном хозяйстве, транспортной, коммунально-бытовой и военной сфере. Следствием их бурного развития является то, что теоретическая база для расчетов и проектирования не успевает за практической реализацией. Это относится также к ходовой части, которая является одной из главных составных частей подобных платформ и состоит из движителя и системы поддрессоривания. Однако наличие системы поддрессоривания является дискуссионным вопросом, в частности, для платформ с полной массой до 1000 кг. В данной работе представлен анализ конструкции ходовой части опытного образца мобильной гусеничной робототехнической платформы и качественные результаты испытаний в различных условиях. Также описан выбор схемы и расчет узла подвески с наборным пластинчатым торсионом в качестве упругого элемента. На основании этого дано обоснование наличия системы поддрессоривания в зависимости от назначения платформы. Результаты работы могут быть использованы при расчете и проектировании новых мобильных гусеничных робототехнических платформ.

DESIGN FEATURES OF THE CHASSIS OF TRACKED ROBOTIC PLATFORM

Artemyev A.V., Zyabkin G.V., Kutuzov A.M., Noskov M.S., Smirnov Ya.N.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg

Keywords: chassis, suspension, mover, suspension system, robotic platform, torsion.

Abstract. The development of mobile tracked robotic platforms is an actual and in-demand task. Currently, such platforms are actively used and tested in agriculture, forestry, transportation, public utilities, and the military. Due to their rapid development, the theoretical basis for calculations and design has not kept pace with practical implementation. This also applies to the chassis, which is one of the main components of such platforms and consists of a mover and a suspension system. However, the presence of a suspension system is debatable, particularly for platforms with a gross vehicle weight of up to 1000 kg. This study presents an analysis of the chassis design of a prototype mobile tracked robotic platform and qualitative test results under various conditions. It also describes the design selection and calculation of a suspension unit with a composite plate torsion bar as an elastic element. Based on these findings, a rationale for the inclusion of a suspension system is provided, depending on the platform's intended purpose. The results of the study can be used in the calculation and design of new mobile tracked robotic platforms.

Введение. В настоящее время происходит активное развитие робототехники и, в частности, разработка наземных мобильных робототехнических платформ. Подобные платформы преимущественно используют два типа движителей: колесный и гусеничный. Выбор типа движителя зависит от условий эксплуатации и решаемых задач. В условиях разбитых дорог, пересеченной местности и на грунтах с низкой несущей способностью предпочтительно применение гусеничного движителя, обеспечивающего высокую проходимость.

Разработкой и производством мобильных гусеничных робототехнических платформ занимаются не только оборонные предприятия, но и отраслевые университеты, а также коммерческие компании [1]. Следствием этого является то, что теоретическое описание подобных платформ отстает от их практической реализации. Это касается, в частности, вопросов проектирования ходовой части подобных платформ.

На проектирование ходовой части оказывает влияние отсутствие экипажа на платформе, т.е. плавность хода уже не определяется максимальными вертикальными ускорениями, действующими на месте водителя.

Дискуссионным является вопрос наличия в составе ходовой части системы поддрессирования. Отсутствие системы поддрессирования позволяет уменьшить массу и габариты ходовой части, а также удешевить производство [1]. В целом, это может быть оправданно для платформ массой до 1000 кг, передвигающихся со скоростями не более 10 км/ч. Подвеска платформ массой более 10000 кг должна быть аналогичной экипажным машинам [2].

Испытания и эксплуатация платформы массой 300 кг показали, что динамические нагрузки, возникающие при движении, негативно влияют на работоспособность платформы и установленное на ней оборудование [3]. Ряд авторов [4-7] также утверждает о необходимости наличия системы поддрессирования, в том числе адаптивной [8]. Таким образом, можно сказать, что необходимо проведение расчетов, испытаний и исследований в первую очередь платформ массой до 1000 кг с целью определения необходимости наличия системы поддрессирования.

Таким образом, целью работы является анализ и обоснование принятых конструктивных решений и доработок по ходовой части мобильной гусеничной робототехнической платформы.

Материалы и методы исследований. В качестве предмета исследования выбран опытный образец мобильной гусеничной робототехнической платформы «Объект 314», разработанной коллективом Polytech Voltage Machine Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (рис. 1). Платформа предназначена для транспортирования грузов массой до 300 кг по пересеченной местности со скоростью до 20 км/ч.



Рис. 1. Опытный образец мобильной гусеничной робототехнической платформы «Объект 314»

Ходовая часть платформы «Объект 314» применительно к одному борту состоит из следующих составных частей: двухрядное направляющее колесо с механизмом натяжения; четыре двухрядных опорных катка; два двухрядных поддерживающих ролика; однорядное ведущее колесо; резиноармированная гусеница. Опорные катки, направляющие колеса и поддерживающие ролики изготовлены из полиамида, при этом опорные катки и направляющие колеса унифицированы. Ведущее колесо выполнено из полиуретана и имеет цевочное зацепление с гусеницей. Для ограничения хода балансиров опорных катков применяются упругие резиновые упоры. Основные технические характеристики платформы «Объект 314» представлены в таблице 1. Платформа имеет электрический привод с питанием от аккумуляторной батареи.

Гусеничный движитель имеет заднее расположение ведущего колеса, переднее – направляющего колеса и поддерживающие ролики для поддержания верхней ветви обвода. Система поддрессирования платформы индивидуальная торсионная с амортизаторами.

Расположение торсионов соосное, амортизаторы гидравлические телескопического типа и установлены на первом и четвертом опорных катках внутри корпуса платформы. Конструкция узла подвески представлена на рисунке 2.

Табл. 1. Технические характеристики платформы «Объект 314»

Наименование параметра	Значение
Снаряженная масса, кг	280
Допустимая полная масса, кг	580
Среднее удельное давление на грунт (при полной массе), кПа	17
Длина, мм	1332
Ширина, мм	970
Высота, мм	550
Ширина колеи, мм	750
Дорожный просвет, мм	200
Длина опорной поверхности, мм	750

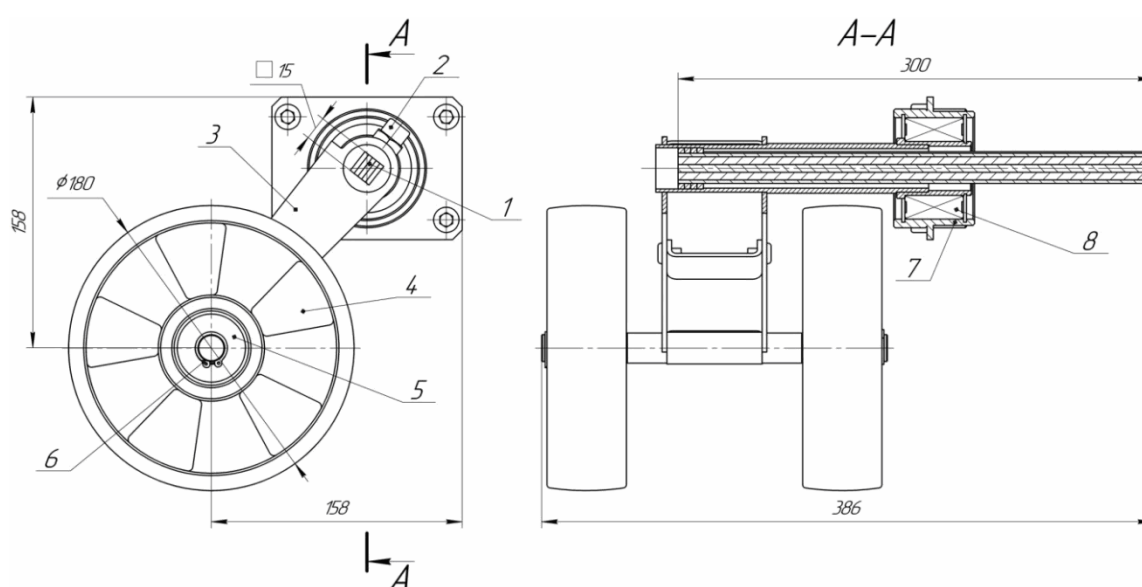


Рис. 2. Узел подвески платформы «Объект 314»: 1 – торсион; 2 – стопорный винт; 3 – балансир; 4 – колесо; 5 – подшипник колеса; 6 – кольцо стопорное; 7 – корпус подшипника балансира; 8 – подшипник балансира

Конструкция торсионов аналогична подвеске автомобиля «Запорожец» [9]. Торсион 1 представляет собой не вал круглого сечения, а стержень квадратного сечения, набранный из пяти пластин из пружинной стали 65Г. Сталь была подвергнута термообработке в виде закалки и отпуска. Торсион на одном конце вставлен во втулку, которая приварена к кронштейну, жестко связанному с рамой платформы. На другом конце он установлен в квадратное отверстие на балансире 3. От осевого перемещения торсион зафиксирован стопорным винтом 2. Подшипник балансира 8 – это шариковый двухрядный радиально-упорный подшипник автомобиля ВАЗ-2108.

Расчет ходовой части был основан на формулах из источников [9, 10]. При этом изначальный расчет системы поддрессоривания проводился для торсиона круглого сечения. Квадратное сечение подбиралось, исходя из необходимости сохранения полярного момента инерции и жесткости исходного торсиона круглого сечения. Расчет параметров торсиона представлен ниже. Расчетная кинематическая схема узла подвески представлена на рисунке 3.

Угол наклона балансира в статическом положении:

$$\beta_0 = \arcsin\left(\frac{H_{\text{к.ст}} + H_a - H_{\Gamma} - R_{\text{к}}}{R_{\text{Г}}}\right), \quad (1)$$

где $H_{к.ст}$ – статический дорожный просвет; H_a – высота заделки оси балансира относительно дна; H_r – толщина гусеницы; R_k – радиус опорного катка; R_6 – радиус балансира.

Поддрессоренная масса платформы:

$$M_{п} = 0,85 \cdot M, \quad (2)$$

где M – допустимая полная масса.

Статическая нагрузка подвески, приведенная к оси опорного катка:

$$P_{к.ст} = \frac{M_{п} \cdot g}{n}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; n – общее число опорных катков.

Тогда статическая жесткость подвески:

$$m_{к.ст} = \frac{P_{к.ст} (\cos \beta_0 - \alpha_{ст} \cdot \sin \beta_0)}{\alpha_{ст} \cdot R_6 \cdot (\cos \beta_0)^2}, \quad (4)$$

где $\alpha_{ст}$ – угол поворота балансира, соответствующий статическому ходу опорного катка.

Диаметр торсиона:

$$d_t = \sqrt[4]{\left(m_{к.ст} + P_{к.ст} \frac{\sin \beta_0}{R_6 (\cos \beta_0)^2} \right) \cdot \left(\frac{R_6^2 (\cos \beta_0)^2 l_t}{0,1 \cdot G_{п}} \right)}, \quad (5)$$

где $G_{п}$ – модуль сдвига при кручении для стали 65Г; l_t – длина торсиона.

Полярный момент инерции торсиона круглого сечения:

$$J_p = 0,1 \cdot d_t^4. \quad (6)$$

Жесткость получившегося торсиона:

$$m_t = \frac{J_p \cdot G_{п}}{l_t}. \quad (7)$$

Так как квадратный торсион является наборным, изначально необходимо определить полярный момент инерции одной пластины. По формуле из источника [9] получаем:

$$J_{p \Pi} = \beta b \delta^3, \quad (8)$$

где β – коэффициент формы сечения, определяемый отношением $\frac{b}{\delta}$; b – ширина пластины; δ – толщина пластины.

Учитывая, что крутящий момент распределяется между отдельными пластинами равномерно [9], можно определить полярный момент инерции наборного торсиона квадратного сечения:

$$J_{p \kappa} = J_{p \Pi} \cdot n_{п}, \quad (9)$$

где $n_{п}$ – число пластин в наборном торсионе.

Тогда жесткость наборного торсиона квадратного сечения:

$$m_{т \kappa} = \frac{J_{p \kappa} \cdot G_{п}}{l_t}. \quad (10)$$

Значения исходных данных для расчета ходовой части следующие: $M = 580$ кг; $l_t = 0,3$ м; $R_6 = 0,15$ м; $R_k = 0,09$ м; $H_{к.ст} = 0,2$ м; $H_a = 0,015$ м; $H_r = 0,0065$ м; $g = 9,81$ м/с²; $n = 8$; $\alpha_{ст} = 0,27$ рад; $G_{п} = 8,4 \cdot 10^{10}$ Па; $\beta = 0,29$; $b = 0,015$ м; $\delta = 0,003$ м; $n_{п} = 5$.

После подстановки исходных данных в формулы (1)-(10) получаем, что жесткость торсиона круглого сечения равна 183,7 Н·м/рад, а наборного квадратного сечения – 165,2 Н·м/рад.

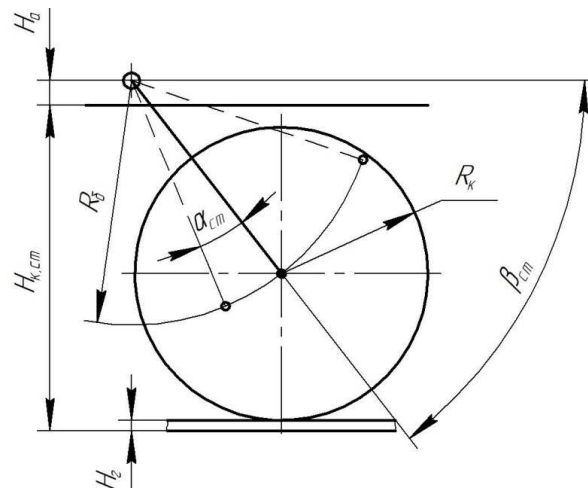


Рис. 3. Расчетная кинематическая схема узла подвески

Получившаяся жесткость наборного торсиона квадратного сечения оказалась ниже рассчитанной для круглого сечения примерно на 10%. Однако при имеющихся компоновочных и технологических ограничениях данный результат можно считать приемлемым.

Результаты. Для проверки конструкции платформы и выявления недостатков проводились испытания в реальных условиях эксплуатации.

Первоначально на платформе амортизаторы не были установлены, вследствие этого при движении по неровностям наблюдалось значительно раскачивание платформы и потеря устойчивости движения. Также при преодолении препятствий и движении задним ходом наблюдалось выворачивание задних опорных катков (рис. 4, слева). Установка амортизаторов и ограничителей хода опорных катков частично решила данную проблему, но вертикальная раскачка платформы при резком начале движения и торможении сохранилась, что, видимо, является следствием небольшой длины опорной поверхности.

Конструкция упругих упоров также оказалась неудовлетворительной, так как в процессе движения их крепление ослабевало. Решением стало приваривание к их верхней части металлических уголков для увеличения жесткости (рис. 4, справа).

В целом, после изменений конструкция ходовая часть платформы обеспечивала высокую проходимость, в том числе на песчаном грунте, и преодоление препятствий на пересеченной местности (рис. 5), таких как вертикальная стенка высотой 150 мм, ров шириной 300 мм, брод глубиной 200 мм.



Рис. 4. Выворачивание задних опорных катков (слева) и конструкция упругих упоров третьего и четвертого опорных катков (справа)



Рис. 5. Преодоление вертикальной стенки (слева) и брода (справа)

При расширении сферы применения платформы до уборки снега с помощью навесных модулей (отвал и шнекороторная приставка), устанавливаемых в передней части, выявилось, что жесткости подвески явно недостаточно. Это приводило к значительному наклону платформы на переднюю часть, следствием чего являлась перегрузка передних опорных катков и балансиров. Это, в свою очередь, приводило к неудовлетворительной работе навесных модулей.

Для избавления от этого явления подвеска была заблокирована за счет установки жестких ограничителей хода вместо упругих упоров. Эти ограничители хода заблокировали балансиры опорных катков от вертикальных перемещений. После этой модернизации платформа смогла достаточно эффективно выполнять задачи по уборке снега (рис. 6).



Рис. 6. Платформа «Объект 314» после модернизации для уборки снега; над балансирами хорошо видны ограничители хода; модули для уборки снега не установлены

Выводы. На основании описания конструкции платформы «Объект 314» и результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Вопрос наличия системы поддрессирования у гусеничных платформ массой до 1000 кг является дискуссионным. Испытания показывают, что индивидуальная торсионная подвеска позволяет платформе со снаряженной массой 280 кг двигаться по пересеченной местности со скоростью до 20 км/ч, преодолевая препятствия, но даже наличие амортизаторов не позволяет в полной мере избавиться от вертикальных перемещений в начале движения и при резких торможениях. Необходимо проведение расчетно-теоретических экспериментов и дополнительных испытаний.

2. При необходимости установки навесных модулей в передней части платформы подвеска не нужна или должна быть заблокирована. В противном случае, работа навесных модулей является проблематичной. В данном случае наиболее целесообразна установка заблокированной системы поддрессирования, обеспечивающей небольшие вертикальные перемещения опорных катков.

3. Рассмотренные конструктивные решения и результаты испытаний можно использовать при проектировании новых мобильных гусеничных робототехнических платформ.

Список литературы

1. Артемьев А.В., Носков М.С., Гайдук В.Д., Добрецов Р.Ю. Особенности конструкции и компоновки малогабаритных гусеничных робототехнических комплексов // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Биробиджан: ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2023. – С. 164-170.
2. Сарач Е.Б., Ткачев Я.А., Крохин М.Э. Выбор характеристик системы поддрессирования быстроходного гусеничного робота // Известия МГТУ МАМИ. – 2021. – Т. 15, №2. – С. 63-70. – doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-63-70.
3. Артемьев А.В., Гайдук В.Д., Носков М.С., Пичахчи С.В., Смирнов Я.Н., Добрецов Р.Ю. Анализ конструкции легкой гусеничной робототехнической платформы на основании результатов испытаний // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: НПО СМ, 2023. – Т. 4. – С. 420-423.
4. Li Y., Wang C., Zhang, C. Optimization of the suspension system and analysis of the ride performance of the crawler-type coal mine search and rescue robot // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022, vol. 44, no. 5, pp. 167. doi.org/10.1007/s40430-021-03332-7.

5. Grazioso A., Galati R., Mantriota G., Reina G. Multibody Simulation of a Novel Tracked Robot with Innovative Passive Suspension // *Advances in Italian Mechanism Science. IFToMM Italy 2022. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham. 2022, vol. 122, pp. 139-146. doi.org/10.1007/978-3-031-10776-4_17.
6. Ugenti A., Galati R., Mantriota G., Reina G. Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system // *Mechanism and Machine Theory*. 2023, vol. 182, p. 105237. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105237.
7. Bruzzone L., Nodehi Sh. E., Fanghella P. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review // *Machines*. 2022, vol. 10, no. 8, p. 648. doi.org/10.3390/machines10080648.
8. Филатов В.И., Зезюлин Д.В., Тюгин Д.Ю., Пронин П.И., Зарубин Д.Н., Ерёмин А.А., Беляков В.В., Куркин А.А. Разработка наземного мобильного робота, оснащенного системами адаптивной подвижности // *Транспортные системы*. 2018. № 2(8). С. 30-40. doi: 10.46960/62045_2018_2_30.
9. Абрамов В.В., Кичаев П.М., Тетерин Г.В., Стешенко В.П., Бутенко Б.И., Огурцов Б.И., Чеботарев В.А., Чесняк В.М. Расчет на прочность, технологические и конструктивные пути повышения долговечности пластинчатого торсиона // *Расчет, конструирование и исследование автомобиля «Запорожец». Сборник статей.* – М.: Машиностроение, 1970. – С. 116-144.
10. Носов Н.А., Галышев Ю.В., Волков Ю.П., Харченко А.П. Расчет и конструирование гусеничных машин. – Л.: Машиностроение, 1972. – 560 с.

References

1. Artemyev A.V., Noskov M.S., Gayduk V.D., Dobretsov R.Yu. Features of the design and layout of compact tracked robotic complexes // *Mathematical and experimental modeling of physical processes: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation.* – Birobidzhan: PGU Sholom-Aleichem, 2023. – P. 164-170.
2. Sarach Ye.B., Tkachev Ya.A., Krokhin M.E. Selection of the characteristics of the suspension system of the high-speed tracked robot // *News of the MSTU «MAMI»*. 2021, vol. 15, no. 2, pp. 63-70. – doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-63-70.
3. Artemyev A.V., Gayduk V.D., Noskov M.S., Pichakhchi S.V., Smirnov Ya.N., Dobretsov R.Yu. Analysis of the design of a lightweight tracked robotic platform based on test results // *Current issues of protection and security: Proceedings of the XXVI All-Russian scientific-practical conference.* – SPb.: NPO SM, 2023. – Vol. 4. – P. 420-423.
4. Li Y., Wang C., Zhang, C. Optimization of the suspension system and analysis of the ride performance of the crawler-type coal mine search and rescue robot // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022, vol. 44, no. 5, pp. 167. doi.org/10.1007/s40430-021-03332-7.
5. Grazioso A., Galati R., Mantriota G., Reina G. Multibody Simulation of a Novel Tracked Robot with Innovative Passive Suspension // *Advances in Italian Mechanism Science. IFToMM Italy 2022. Mechanisms and Machine Science*, Springer, Cham. 2022, vol. 122, pp. 139-146. doi.org/10.1007/978-3-031-10776-4_17.
6. Ugenti A., Galati R., Mantriota G., Reina G. Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system // *Mechanism and Machine Theory*. 2023, vol. 182, p. 105237. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105237.
7. Bruzzone L., Nodehi Sh. E., Fanghella P. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review // *Machines*. 2022, vol. 10, no. 8, p. 648. doi.org/10.3390/machines10080648.
8. Filatov V.I., Zezyulin D.V., Tyugin D.Yu., Pronin P.I., Zarubin D.N., Yeremin A.A., Belyakov V.V., Kurkin A.A. Development of a ground-based mobile robot equipped with adaptive mobility systems // *Transport systems*. 2018, no. 2 (8), pp. 30-40. doi.org/10.46960/62045_2018_2_30.
9. Abramov V.V., Kichaev P.M., Teterin G.V., Steshenko V.P., Butenko B.I., Ogurtsov B.I., Chebotarev V.A., Chesnyak V.M. Strength analysis and technological and structural approaches to increasing the durability of leaf torsion bar // *Calculation, design, and research of the «Zaporozhets» car. Collection of articles.* – M.: Mechanical engineering, 1970. – P. 116-144.
10. Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.P., Kharchenko A.P. Calculation and design of tracked vehicles. – L.: Mechanical engineering, 1972. – 560 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Артемьев Александр Валерьевич – аспирант	Artemyev Aleksandr Valeryevich – postgraduate student
Зябкин Геннадий Викторович – студент	Zyabkin Gennadiy Viktorovich – student
Кутузов Александр Максимович – студент	Kutuzov Aleksandr Maksimovich – student
Носков Михаил Сергеевич – аспирант	Noskov Mikhail Sergeevich – postgraduate student
Смирнов Ярослав Николаевич – аспирант	Smirnov Yaroslav Nikolaevich – postgraduate student
alexandr43105@mail.ru	

Получена 03.06.2026