

УДК 630*78:630*37

А. С. Панкратович, П. А. Протас

Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Стремительное развитие лесного комплекса и его технической оснащенности, увеличение объема заготавливаемой древесины в Республике Беларусь, а также усиление конкуренции на рынке лесоматериалов стали предпосылками необходимости исследования вопросов в области оптимизации транспортных процессов и обеспечения ритмичности лесозаготовительного производства. Транспортно-логистические операции на лесосеке, включающие сбор и погрузку лесоматериалов, их сортировку и трелевку, формирование штабелей на промежуточном складе, являются наиболее трудозатратными в лесозаготовительном производстве. При этом эффективность данных операций во многом определяется оптимальным размещением технологических элементов на лесосеке и их геометрическими параметрами. Одним из путей повышения эффективности освоения лесфонда является решение задачи оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства, для чего необходимо определить соответствующие критерии и ограничения.

В результате проведенного анализа изучены основные социальные, экономические и технические требования, предъявляемые к критериям оптимизации, определены основные критерии эксплуатационной и экономической эффективности (оптимальное расположение трелевочных волоков, усов и погрузочных пунктов, расстояние трелевки, производительность, удельные капиталовложения и себестоимость), оказывающие наибольшее влияние на транспортно-логистические операции лесозаготовительного производства. Приведены способы и методики их определения и сделаны основные выводы по результатам проведенного анализа.

Ключевые слова: критерии, оптимизация, лесосека, транспортно-логистические операции, требования, эффективность, производительность.

Для цитирования: Панкратович А. С., Протас П. А. Анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2023. № 1 (264). С.133–138. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-14.

A. S. Pankratovich, P. A. Protas

Belarusian State Technological University

ANALYSIS OF CRITERIA FOR OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS OPERATIONS OF LOGGING PRODUCTION

The rapid development of the forest complex and its technical equipment, an increase in the volume of harvested wood in the Republic of Belarus, as well as increased competition in the timber market have become prerequisites for the need to study issues in the field of optimizing transport processes and ensuring the rhythm of logging production. Transport and logistics operations in the cutting area, including the collection and loading of timber, their sorting and skidding, the formation of stacks in an intermediate warehouse are the most labor-intensive in logging production. At the same time, the effectiveness of these operations is largely determined by the optimal placement of technological elements in the cutting area and their geometric parameters. One of the ways to increase the efficiency of the development of the forest fund is to solve the problem of optimizing the transport and logistics operations of logging production, for which it is necessary to determine the appropriate criteria and restrictions.

As a result of the analysis, the main social, economic and technical requirements for optimization criteria were studied, the main criteria of operational and economic efficiency were determined (optimal location of skidding lugs, whiskers and loading points, skidding distance, productivity, specific investments and cost) that have the greatest impact on the transport and logistics operations of logging production. The methods and methods of their determination are given and the main conclusions based on the results of the analysis are made.

Keywords: criteria, optimization, cutting area, transport and logistics operations, requirements, efficiency, productivity.

For citation: Pankratovich A. S., Protas P. A. Analysis of criteria for optimization of transport and logistics operations of logging production. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2023, no. 1 (264), pp.133–138. DOI: 10.52065/2519-402X-2023-264-14. (In Russian).

Введение. В настоящее время, лесозаготовительное производство Республики Беларусь стремительными темпами развивается в направлении повышения объемов заготовки древесины машинным способом. С применением систем машин «харвестер – форвардер» заготавливают более 52% от общего объема заготовки по всем видам рубок [1] и наблюдается рост данного показателя. Это связано, прежде всего, с необходимостью повышения производительности труда, эффективности и качества разработки территорий лесного фонда; с обеспечением освоения лесфонда в кратчайшие сроки и ритмичностью поставок сырья потребителям; недостатком рабочих в сельской местности и др.

Однако следует отметить, что даже при обоснованном выборе системы машин для проведения лесозаготовок, но отсутствии надлежащей организации работы эффективность заготовки значительно снижается. Особенно это выражено при выполнении переместительных операций, к которым относятся сбор и погрузка лесоматериалов, их сортировка и трелевка (подвозка), формирование штабелей на промежуточном складе.

Поэтому одним из важнейших аспектов повышения эффективности лесозаготовительной деятельности является качественная организация работы, которая должна основываться на оптимизации выполнения операций, в том числе транспортно-логистических, проводимых непосредственно на лесосеке и промежуточном складе.

Для проведения необходимых оптимизационных расчетов в первую очередь следует иметь показатели для оценки эффективности оптимизируемого объекта или же критерии оптимизации.

Основная часть. Целью исследования является анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства. В соответствии с целью задачи исследования включают:

- анализ требований к подбору критериев оптимизации транспортно-логистических операций;
- выбор основных критериев оптимизации;
- оценку методов определения выбранных критериев.

При выборе критериев, используемых для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства, следует учитывать, что каждый

оптимизируемый объект должен соответствовать определенным социальным, экономическим, экологическим и техническим требованиям [2]:

– *социальные* требования заключаются в основном в обеспечении безопасности труда, в улучшении санитарно-гигиенических условий для облегчения труда персонала. Данные требования в настоящее время не имеют какого-либо общего количественного выражения критерия, и соблюдение их осуществляется путем следования различным санитарно-гигиеническим нормам и требованиям техники безопасности;

– *экономические* требования заключаются в необходимости обеспечения экономической целесообразности оптимизируемого объекта, т. е. при внедрении нового оптимизируемого объекта в производство он должен повышать производительность труда при минимальных материальных и трудовых затратах, а в случае же, когда оптимизируемый объект является действующим на предприятии, на данный момент, он должен выполнять заданный объем работ или выпуска продукции с минимально возможными затратами материальных и трудовых ресурсов;

– *экологические* требования учитывают необходимость обеспечения норм воздействия машин и технологий на лесные экосистемы, регламентированных соответствующими ТНПА;

– *технические* требования к оптимизируемому объекту представляют собой использование современных достижений науки и техники при его проектировании и организации работ. Объект должен соответствовать своему назначению, а его технические параметры обеспечивать качественное выполнение требуемых работ и их объемов. Существует большое количество показателей технического совершенства оптимизируемого объекта, что в свою очередь усложняет выбор критериев оптимизации. Если, например, в качестве оптимизируемого объекта рассматривать лесозаготовительную технику, то о ее техническом уровне конструкций могут свидетельствовать: материалоемкость, эксплуатационная надежность и долговечность, коэффициент полезного действия, степень унификации и нормализации, динамические и кинематические показатели и др. А о совершенстве их конструкций можно судить по величине производительности труда за единицу времени, продолжительности рабочего цикла,

удельному расходу материалов, уровню механизации и автоматизации работ, универсальности машин, безопасности и санитарно-гигиеническим условиям труда.

Оптимизировать объект по такому большому количеству критериев не представляется возможным. Поэтому решение задачи оптимизации может выполняться путем выбора единого обобщенного критерия оптимизации; проведения последовательной оптимизации по наиболее важным показателям; проведения оптимизации одновременно по нескольким критериям (многокритериальная оптимизация).

Для решения актуальных задач лесопромышленного производства оптимизации с помощью одного критерия недостаточно, поэтому всегда следует иметь в виду, что оптимизация объектов и процессов и оптимальное управление ими возможны только при использовании **системы критериев путем последовательной оптимизации** с созданием ограничений по величине показателей, не используемых в качестве критериев, или путем проведения многокритериальной оптимизации.

В процессе лесопромышленной деятельности выполняют большой объем транспортно-логистических операций, оказывающих существенное влияние на эффективность лесозаготовительного производства в целом. При этом для статистической оценки данных операций необходимо учитывать временные параметры (продолжительность циклов, простоев), параметры эксплуатационных условий (таксационные, грунтовые и др.) и технико-экономические параметры (производительность, удельная себестоимость и др.).

Для повышения эффективности переместительных операций необходимо соответствовать многим требованиям и ограничениям как в плане технологии работы самой техники, так и в организации размещения транспортно-технологических элементов на лесосеке [3–9].

При разработке лесосек в Республике Беларусь можно отметить несколько типичных вариантов схем размещения трелевочных волоков [10], таких как параллельная, диагональная, радиальная.

Данные варианты являются более предпочтительными в силу того, что они уже опробованы на практике. Для работы форвардеров наиболее широко применяется параллельная схема размещения трелевочных волоков. При этом на лесосеках простой прямоугольной формы размещение волоков не вызывает трудностей. На практике в основном отводят лесосеки неправильной сложной формы ввиду таксационных характеристик и других факторов. Тогда возникают определенные проблемы с

выбором рационального размещения технологических элементов на лесосеке, а также усложняются необходимые расчеты. В таком случае расчет определения **оптимального расположения волоков, усов (подъездных путей) и погрузочных пунктов** основывается на **уменьшении затрат на освоение лесосеки, а также минимизации грузовой работы по трелевке древесины** в соответствии со схемами освоения лесосек (рисунок) [11].

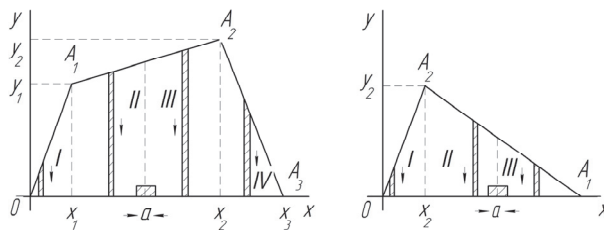


Рис. Схемы освоения лесосек сложной формы

Зависимости для определения места расположения погрузочного пункта на лесосеке с учетом ее геометрии приведены ниже.

1. Когда лесосека имеет форму трапеции, место расположения погрузочного пункта a будет рассчитываться по следующей формуле [11]:

$$a = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{4}, \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – координаты вершин соответственно A_1, A_2, A_3 .

2. В случае прямоугольной формы лесосеки

$$a = \frac{x_2}{2}. \quad (2)$$

3. В случае треугольной формы лесосеки

$$a = \begin{cases} x_1 - \sqrt{\frac{x_1(x_1 - x_2)}{2}}, & \text{если } x_2 > \frac{x_1}{2}, \\ x_2, & \text{если } x_2 = \frac{x_1}{2}, \\ 1 - \sqrt{\frac{x_1 x_2}{2}}, & \text{если } x_2 < \frac{x_1}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Оптимальное размещение погрузочного пункта на лесосеке, а также ее нетипичная геометрия оказывают большое влияние на такой показатель, как **расстояние трелевки** $S_{\text{тр}}$, м. Это один из важнейших факторов, влияющих на эффективность лесозаготовительного производства и объем переместительных операций. Уменьшение расстояния трелевки позволит значительно сократить время, затрачиваемое на проведение переместительных операций на лесосеке.

Данный показатель для лесосек стандартной конфигурации в Республике Беларусь обычно рассчитывается по следующей формуле [12]:

$$S_{cp} = (k_1 a + k_2 b) k_0, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от схемы расположения трелевочных волоков на лесосеке; a – ширина делянки, м; b – длина делянки, м; k_0 – коэффициент удлинения трелевочных волоков, зависящий от рельефа местности (при тракторной трелевке $k_0 = 1,1–1,4$; при трелевке канатными установками $k_0 = 1,05–1,15$).

В случае же когда форма лесосеки имеет более сложную геометрию, можно воспользоваться следующей формулой [12]:

$$S_{cp} = \frac{2 \sum dR}{abq_0}, \quad (5)$$

где dR – элементарная грузовая работа; q_0 – средний запас древесины на 1 м^2 , м^3 .

Важным критерием эксплуатационной эффективности лесозаготовительной техники, а также совершаемых ею операций является ее **производительность**, или же количество продукции, получаемой либо перемещаемой за единицу времени. Если говорить о производительности как о критерии эффективности оптимизируемого объекта, тогда следует иметь в виду действительную производительность, при расчете которой учитываются потери времени на подготовительно-заключительные операции, отдых оператора, потери по различным организационно-техническим причинам и др. Расчет подобной производительности сильно отличается для разных видов лесозаготовительной техники, но в общем виде ее можно рассчитать по следующей формуле [13]:

$$\Pi = \frac{T \phi_1 V}{t_{ц}}, \quad (6)$$

где T – продолжительность работы машины, с; ϕ_1 – коэффициент использования рабочего времени; V – объем или масса единицы продукции (если производительность определяется по количеству единиц продукции, $V = 1$); $t_{ц}$ – время, необходимое на обработку или перемещение единицы продукции, с.

В свою очередь, стоит помнить о важности **экономических критериев** при проведении оптимизации. В качестве единого экономического критерия оптимизации объекта может использоваться максимум прибыли, или максимум роста дохода, или же суммарные приве-

денные затраты на создание, содержание и эксплуатацию объекта. Более детально можно использовать системный показатель, который включает в себя **удельные капиталовложения** K , необходимые для осуществления процесса, и **удельную себестоимость** C работ или продукции, получаемых в процессе осуществления данного процесса. В таком случае лучший вариант осуществления переместительных операций выбирается посредством сравнения себестоимости работ C и капиталовложений K для их осуществления. Здесь возможны несколько характерных вариантов.

1. Варианты равноценны: $C_1 = C_2$; $K_1 = K_2$.

2. Второй вариант эффективнее: $C_1 > C_2$; $K_1 > K_2$.

3. Случай, когда для окончательного решения дополнительно необходимо определять окупаемость капитальных вложений: $C_1 > C_2$; $K_1 < K_2$.

В случае же если таких вариантов больше двух, необходимо дополнительно рассчитывать затраты Z_n , руб., на проведение работ или получение продукции по следующей формуле:

$$Z_n = C + \Xi_n K, \quad (7)$$

где Ξ_n – отраслевой нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Заключение. Выполненный анализ критериев оптимизации транспортно-логистических операций лесозаготовительного производства позволил сделать следующие выводы:

– при проведении оптимизации и выборе критериев оптимизации необходимо учитывать их соответствие определенным социальным, экономическим, экологическим и техническим требованиям;

– для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций требуется комплексный подход. В этом случае одного критерия оптимизации не достаточно и более эффективно применять последовательную или многокритериальную оптимизацию;

– в качестве критериев для решения задачи оптимизации транспортно-логистических операций могут использоваться схемы расположения волоков, подъездных путей и погрузочных пунктов, расстояние трелевки, производительность машин, удельные капиталовложения и себестоимость работ;

– для проведения оптимизационных расчетов, приведенных выше, необходимо обладать большим количеством актуальных данных не только об оптимизируемом объекте, но и о предприятии в целом. Эти данные могут быть

получены разными путями из различных нормативно-правовых актов [14–16], регламентирующих проведение лесохозяйственной деятельности, локальной технико-экономической

документации конкретных предприятий, а также с помощью проведения экспериментальных исследований непосредственно на оптимизируемом участке лесного фонда.

Список литературы

1. Заготовка и переработка древесных лесных ресурсов // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-main-activities/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (дата обращения: 14.10.2022).
2. Алябьев В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: Лесная промышленность, 1977. 232 с.
3. Изотова Е. Н. О факторах повышения эффективности работы на харвестерах и форвардерах // Приоритетные направления развития науки и образования. 2016. № 4-2 (11). С. 67–68.
4. Просужих А. А. Повышение производительности колесных форвардеров обоснованием их параметров и режимов работы: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2020. 158 л.
5. Федоренчик А. С., Протас П. А., Хотянович А. И. Повышение эффективности эксплуатации системы машин «харвестер – форвардер» // Наука и инновации вузов – производству: взаимодействие, эффективность, перспективы: сб. ст. и тез. науч.-практ. семинара. Минск, 22–23 мая 2007 г. Минск, 2008. С. 78–80.
6. Полукаров М. В. Оценка резервов эксплуатационных затрат систем машин заготовки древесины «харвестер – форвардер» // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург, 2017. С. 23–25.
7. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Рудов С. Е. Экспериментальные исследования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583.
8. Божбов В. Е. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2015. 119 с.
9. Кузнецов А. В. Эффективность транспортных операций в сложных природно-производственных условиях // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. 2005. № 6. С. 28–29.
10. Матвейко А. П., Протас П. А. Технология и машины лесосечных работ. Минск: БГТУ, 2008. 116 с.
11. Игнатенко В. В., Турлай И. В., Федоренчик А. С. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. Минск: БГТУ, 2004. 180 с.
12. Матвейко А. П., Федоренчик А. С. Технология и машины лесосечных работ. Минск: Технопринт, 2002. 480 с.
13. Матвейко А. П., Клоков Д. В., Протас П. А. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2013. 199 с.
14. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1360-2002. Минск: Госстандарт, 2003. 16 с.
15. Лесной кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (дата обращения: 14.10.2022).
16. Лесной фонд // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (дата обращения: 14.10.2022).

References

1. Harvesting and processing of wood forest resources. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forest/zagotovka-i-ispolzovanie-drevesnykh-lesnykh-resursov> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
2. Alyab'yev V. I. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov na lesozagotvokakh* [Optimization of production processes in logging]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 232 p. (In Russian).
3. Izotova E. N. About the factors of increasing the efficiency of work on harvesters and forwarders. *Prioritetnyye napravleniya razvitiya nauki i obrazovaniya* [Priority directions of development of science and education], 2016, no. 4-2 (11), pp. 67–68 (In Russian).
4. Prosuzhikh A. A. *Povysheniye proizvoditel'nosti kolesnykh forvarderov obosnovaniyem ikh parametrov i rezhimov raboty. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improving the performance of wheel forwarders by justifying their parameters and operating modes. Dissertation PhD (Engineering)]. Ukhta, 2020. 158 p. (In Russian).

5. Fedorenchik A. S., Protas P. A., Khotyanovich A. I. Improving the operational efficiency of the harvester-forwarder machine system. *Nauka i innovatsii vuzov – proizvodstvu: vzaimodeystviye, effektivnost', perspektivy: sbornik statey i tezisov nauchno-prakticheskogo seminara* [Science and innovation of universities – production: interaction, efficiency, prospects: a collection of articles and abstracts of a scientific and practical seminar]. Minsk, 2008, pp. 78–80 (In Russian).
6. Polukarov M. V. Estimation of operating cost reserves of harvester – forwarder wood harvesting machine systems. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: materialy XIII Vse-rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov i konkursa po programme "Umnik"* [Scientific creativity of youth – to the forest complex of Russia: materials of XIII All-Russian scientific and technical conference of students and postgraduates and the competition under the program "Umnik"]. Ekaterinburg, 2017, pp. 23–25 (In Russian).
7. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E. Experimental studies of forwarder performance taking into account its operational characteristics, cutting area parameters, and physical and mechanical properties of the soil. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 94–124. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5583 (In Russian).
8. Bozhbov V. E. *Povysheniye effektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya reysovoy nagruzki forvarderov* [Improving the efficiency of the skidding process by justifying the flight load of forwarders]. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical University Publ., 2015. 119 p. (In Russian).
9. Kuznetsov A. V. Efficiency of transport operations in difficult natural and industrial conditions. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta PetrGU* [Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU], 2005, no. 6, pp. 28–29 (In Russian).
10. Matveyko A. P., Protas P. A. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 116 p. (In Russian).
11. Ignatenko V. V., Turlai I. V., Fedorenchik A. S. *Modelirovaniye i optimizatsiya protsessov lesozagotovok* [Modeling and optimization of logging processes]. Minsk, BGTU Publ., 2004. 180 p. (In Russian).
12. Matveiko A. P., Fedorenchik A. S. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 480 p. (In Russian).
13. Matveiko A. P., Klovov D. V., Protas P. A. *Tekhnologiya i oborudovaniye lesosechnykh i lesoskladskikh rabot* [Technology and equipment of logging and timber works]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 199 p. (In Russian).
14. STB 1360-2002. Sustainable forest management and forest exploitation. Cabins of the main use. Technology requirements. Minsk, Gosstandart Publ., 2003. 16 p. (In Russian).
15. Forest Code of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (accessed 14.10.2022) (In Russian).
16. Forest Fund. Available at: <https://mlh.by/our-main-activities/forestry/forests/> (accessed 14.10.2022) (In Russian).

Информация об авторах

Панкратович Александр Сергеевич – аспирант кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: halva97@mail.ru

Протас Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: protas77@rambler.ru

Information about the authors

Pankratovich Alexander Sergeevich – PhD student, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: halva97@mail.ru

Protas Pavel Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: protas77@rambler.ru

Поступила 20.10.2022