

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОКВАРТАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕСОСЕК В НЕЧЕТКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Рукомойников К.П.¹

¹ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Республика. Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д.3), e-mail: info@volgatech.net

В статье предложены принципы построения и расчета растянутых во времени графоаналитических моделей операционной сети, позволяющие обосновать последовательность освоения лесосек и выполнения технологических операций в нечетких динамических природно-производственных условиях освоения лесного квартала, сократить технологические простои и повысить эффективность лесозаготовительных работ предприятия. Для решения предложенной графоаналитической модели разработан алгоритм поиска потока минимальной стоимости, обоснования величины характерных для него затрат и расчета максимальных пропускных способностей путей между фиктивным источником и стоком в структуре предложенных графических моделей. Модель отличается комплексным учетом двух основных характеристик технологического процесса лесосечных работ: производительности и трудозатрат, представленных в качестве пропускных способностей дуг графа.

Ключевые слова: лесной квартал, лесозаготовка, трелевка, вывозка лесоматериалов, погрузочный пункт, теория графов, поток минимальной стоимости, нечеткие динамические природно-производственные условия

GRAPHIC-ANALYTICAL MODELING OF TECHNOLOGY OF FOREST HARVESTING IN FOREST COMPARTMENT WITH FUZZY DYNAMIC NATURAL PRODUCTION CONDITIONS

Rukomojnikov K.P.¹

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3), e-mail: info@volgatech.net

In this paper proposed the principles and calculations of stretched in time graphic-analytical models of the operating network. They allow you to determine the sequence of logging operations at logging sites within the forest compartment, to reduce nonmechanical delay and increase technological efficiency of harvesting operations with fuzzy dynamic natural-production conditions. Search algorithm minimal cost flow developed to solve the proposed graphic-analytical model. It allows justifying the amount of expenses and calculating a maximum bandwidth of arcs between the fictitious source and drain of graphical model. The model differs complex use of two main characteristics of the process of logging operations: productivity and labor costs presented as individual capacities of graph arcs.

Keywords: forest compartment, logging, skidding, haulage, loading point, graph theory, flow of minimum cost, fuzzy dynamic natural production conditions.

Как известно подбор комплекта машин при формировании парка лесозаготовительной техники лесопромышленного предприятия желательно осуществлять таким образом, чтобы средняя производительность всех машин в системе была равна или кратна производительности ведущей машины. Однако, природно-производственные условия каждой лесосеки значительно отличаются от аналогичных средних показателей по предприятию. Любое отклонение природно-производственных условий каждой лесосеки от средних показателей, характеризующих весь лесосечный фонд предприятия, приводит к несогласованной работе комплекта лесосечных машин. Данная проблема может быть частично урегулирована в условиях по-

квартального освоения участков лесного фонда посредством обоснования последовательности и технологии лесосечных работ на отдельных лесосеках квартала [7, 8, 9].

Следует учесть, что в реальных производственных условиях лесосек такие параметры как производительность лесозаготовительных машин и себестоимость выполнения различных переместительных и обрабатывающих операций в постоянно меняющихся условиях внешней среды не могут быть заранее точно известны [10]. Таким образом, очевидно, что в данном случае мы имеем дело со стационарно-динамическими потоковыми задачами в нечетких динамических природно-производственных условиях окружающей среды, не предусматривающими мгновенное прохождение всего потока по дугам графа.

Оптимизации потока в транспортных системах посвящены исследования [2, 3, 5, 6]. В работах [1, 4] предложен вариант решения проблем нахождения максимального потока, рассматривающий параметры транспортной сети как нечеткие треугольные числа, решены вопросы сложения, вычитания и сравнения нечетких чисел треугольной формы.

Описанные выше исследования дают представление о возможностях выполнения расчетов в нечетких условиях транспортной сети, однако, не могут быть использованы в решении вопросов технологического процесса лесосечных работ без учета специфики отрасли.

Цель исследования. Обоснование рациональной технологии работ при освоении лесного квартала в условиях комплексного учета технологических особенностей разработки всех лесосек на его территории.

Материал и методы исследования. Для достижения поставленной цели предложены варианты графов для реализации всех типов технологических процессов лесосечных работ. В частности, на рисунке представлен «растянутый во времени» динамический граф, характеризующий технологический процесс освоения лесного квартала с выполнением всех обрабатывающих операций технологического процесса на посеках. Граф создан путем образования отдельной копии каждой вершины $x_i \in X$ в каждый рассматриваемый период времени $\theta \in T$. Множество вершин X_p графа G_p задается как $X_p = \{(x_i, \theta) : (x_i, \theta) \in X \times T\}$. Множество дуг \tilde{A}_p представлено дугами, исходящими из каждой пары «вершина-время» $(x_i, \theta) \in X_p$ в каждую пару «вершина-время» (x_j, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$. При этом $x_j \in \Gamma(x_i)$, а $\theta + \tau_{ij}(\theta) \leq p$. Пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, соединяющие пары «вершина-время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ равны ∞ , а пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta)$, соединяющие пары «вершина-время» (x_i, θ) и (x_j, θ) равны $\tilde{V}_{ij}(\theta)$ и могут быть рассчитаны путем анализа указанных на графе величин трудозатрат $\tilde{f}_{ij}(\theta)$ на выполнение отдельных операций.

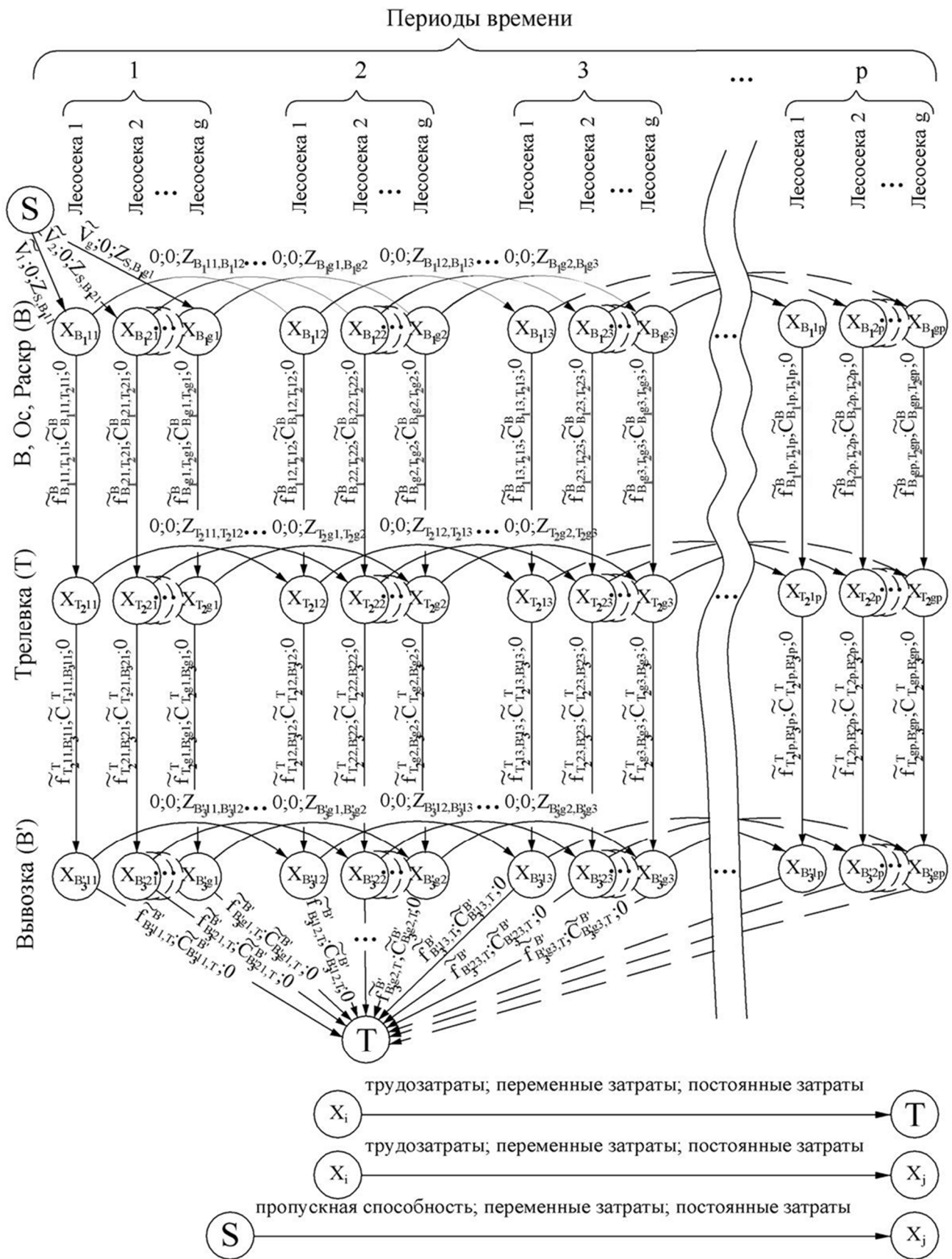


Рис. Графическая модель операционной сети к обоснованию последовательности разработки лесосек на территории лесного квартала в нечетких динамических природно-производственных условиях окружающей среды с выполнением всех обрабатывающих операций технологического процесса на пасаках

Вершина S представляет собой фиктивный источник, а вершина T – фиктивный сток. Каждая анализируемая операция технологического процесса представлена в графе промежуточными вершинами $x_{N_h \ell \theta}$, расположенными между источником и стоком. Где N – наименование операции технологического процесса, h – порядковый номер операции в общей последовательности выполнения технологического процесса работ в лесном квартале; ℓ – номер анализируемой лесосеки, θ – номер анализируемого периода времени. Так, например, вершины $x_{B_1 11}, x_{B_1 21}, \dots, x_{B_1 k1}, \dots, x_{B_1 g1}$ характеризуют обрабатывающие операции (валка, обрезка сучьев, раскряжевка), выполняемые на пасеках каждой из g анализируемых лесосек в течение первого временного диапазона, вершины $x_{T_2 12}, x_{T_2 22}, \dots, x_{T_2 k2}, \dots, x_{T_2 g2}$ характеризуют операцию трелевки лесоматериалов на погрузочный пункт в течение второго временного диапазона, вершины $x_{B'_3 11}, x_{B'_3 21}, \dots, x_{B'_3 k1}, \dots, x_{B'_3 g1}$ символизируют операцию вывозки лесоматериалов с территории погрузочного пункта в первом периоде времени и т.д.

Пропускные способности каждой из фиктивных дуг, исходящих из источника, ограничены запасом вырубленной древесины на каждой из g лесосек на территории квартала. Данный показатель на графе может быть обозначен с учетом нечетких пропускных способностей дуг, в виде: $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_k, \dots, \tilde{V}_g$. Так как источник является фиктивной вершиной, то и стоимостные показатели перемещения грузов по исходящим из него дугам, равны 0.

Дуги представленного графа, проложенные между вершинами, символизирующими операции одного временного периода, характеризуют движение потоков сырья по этапам технологического процесса. Протекание потока по данным дугам характеризуется нечеткими пропускными способностями дуг, символизирующими производительность лесосечных машин и оборудования, находящимися в прямой зависимости от трудозатрат (\tilde{f}) на выполнение каждой операции, а так же нечеткими переменными затратами. К нечетким переменным затратам (\tilde{C}), фиксация которых осуществляется при перемещении потока между операциями технологического процесса, могут быть отнесены затраты на топливо, сдельную заработную плату рабочих и т.п. Стоимости перемещения $\tilde{C}(x_i, x_j, \theta, \theta)$ единицы потока по дугам графа, соединяющим пару «вершина-время» (x_i, θ) и (x_j, θ) равны $\tilde{C}_{ij}(\theta)$.

Появляется возможность учета как постоянных, так и переменных затрат, на выполнение анализируемых в графе операций. Дуги, проложенные между вершинами, символизирующими операции одного наименования, но протекающие в различных периодах времени, характеризуют наличие объемов сырья не прошедшего следующую стадию технологического процесса в течение рассмотренных ранее временных периодов. Так, например, к постоянным затратам (Z), фиксация которых осуществляется при перемещении потока с одного временного периода на следующий, можно отнести затраты, связанные с амортизационными

отчислениями, плановые затраты на техническое обслуживание и ремонт используемой техники, заработную плату при повременной оплате труда рабочих и т.п. Стоимости перемещения $Z(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ единицы потока по дугам графа, соединяющим пару «вершина-время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ равны $Z_{ij}(\theta)$.

Задача нахождения максимального потока минимальной стоимости в предложенной нечеткой динамической сети операций технологического процесса освоения лесосек на территории лесного квартала может быть сформулирована следующими математическими зависимостями:

1) Требуется определить минимальный маршрут перемещения потока лесоматериалов по дугам динамической операционной сети в предложенном количестве периодов.

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{(x_i, x_j) \in \tilde{A}} (\tilde{C}_{ij} \cdot \tilde{\xi}_{ij}(\theta) + Z_{ij} \cdot \min\{1; \tilde{\xi}_{ij}(\theta)\}) \rightarrow \min;$$

2) Максимальный объем потока \tilde{v} за p периодов времени равен потоку, выходящему из источника за p периодов времени.

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{sj}(\theta) - \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0};$$

3) Величина потока $\tilde{\xi}_{ji}$, вошедшего в вершину x_i в момент времени $(\theta - \tau_{ji})$ равно числу единиц потока $\tilde{\xi}_{ij}$, выходящему из вершины x_i в момент времени θ .

$$\sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = \tilde{0}, x_i \neq s, t; \theta \in T.$$

Данное условие должно выполняться для каждой вершины x_i без учета фиктивных вершин источника и стока;

4) Максимальная величина потока \tilde{v} , прошедшего через дуги графа за p периодов времени, равно потоку, входящему в сток за этот же период времени.

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{tj}(\theta) - \tilde{\xi}_{jt}(\theta - \tau_{jt}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0};$$

5) При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать то обстоятельство, что суммарные трудозатраты на выполнение одноименных технологических операций каждого (θ) временного периода не должны превышать максимальной продолжительности рабочего времени (m) данного периода. Таким образом, величина потока $(\tilde{\xi}_{(i=b)j}^N(\theta))$, протекающего по дуге $(x_{i=b}, x_j)$ в анализируемом периоде времени (θ) , должна соответствовать следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{(i=b)j}^N(\theta) \leq \frac{m(\theta) - \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^N(\theta) \cdot \xi_{ij}^N(\theta)}{\tilde{f}_{(i=b)j}^N(\theta)},$$

Данное условие должно выполняться для всех моментов времени и всех вершин графа кроме источника и дуг, связывающих между собой различные моменты времени.

$$\forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}(\theta); \theta \in T; x_i \neq s; (x_i, x_j) \neq (x_{N_h \ell \theta}; x_{N_h \ell (\theta+1)}),$$

где b - порядковый номер анализируемой дуги ($1 \leq b \leq g$); m - максимальная продолжительность рабочего времени анализируемого периода, ч.; $\tilde{f}_{ij}^N(\theta)$ – трудозатраты на обработку или перемещение единицы лесоматериалов при выполнении N – операции технологического процесса на протяжении θ – периода времени, ч/м³; $\xi_{ij}^N(\theta)$ - величина потока, перемещаемого с вершины i в θ - период при выполнении N – операции технологического процесса, м³.

Одним из параметров, ограничивающих пропускную способность дуг является производительность $\Pi(\theta)$. В данном случае, под этим показателем понимается объем работы, который может быть выполнен до завершения анализируемого периода времени. По мере расчета, в результате перемещения по дугам графа того или иного грузопотока, происходит уменьшение времени $m^*(\theta)$, оставшегося до завершения анализируемого этапа, равное:

$$m^*(\theta) = m(\theta) - \sum_{i=1}^g \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^N(\theta) \cdot \xi_{ij}^N(\theta).$$

При этом трудозатраты на выполнение той или иной операции технологического процесса и производительность машин и механизмов связаны друг с другом:

$$\Pi_{ij}^N(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^N(\theta)}; f_{ij}^N(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{\Pi_{ij}^N(\theta)}.$$

В условиях нечеткой окружающей природно-производственной среды производительность и трудозатраты могут быть представлены в виде нечетких треугольных чисел: $\tilde{\Pi}_{ij}(\theta) = (\Pi_{ij}(\theta); \Pi_{ij}^L(\theta); \Pi_{ij}^R(\theta)); \tilde{f}_{ij}(\theta) = (f_{ij}(\theta); f_{ij}^L(\theta); f_{ij}^R(\theta))$. Первоначальные значения левой и правой границ нечетких треугольных чисел задаются экспертами. Данные показатели взаимосвязаны и могут быть рассчитаны из соотношений:

$$f_{ij}^{NL}(\theta) = f_{ij}^N(\theta) - \frac{m^*(\theta)}{\Pi_{ij}^N(\theta) + \Pi_{ij}^{NR}(\theta)}; f_{ij}^{NR}(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{\Pi_{ij}^N(\theta) - \Pi_{ij}^{NL}(\theta)} - f_{ij}^N(\theta).$$

Представленные формулы дают возможность получения обратной зависимости:

$$\Pi_{ij}^{NR}(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^N(\theta) - f_{ij}^{NL}(\theta)} - \Pi_{ij}^N(\theta); \Pi_{ij}^{NL}(\theta) = \Pi_{ij}^N(\theta) - \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^N(\theta) + f_{ij}^{NR}(\theta)}.$$

Расчет трудозатрат, характеризующих обратные дуги можно выполнить по формуле

$$f_{ji}^N(\theta) = \frac{m_{ji}^{*обп}(\theta)}{\Pi_{ji}^N(\theta)}.$$

где $m_{ji}^{*обп}$ - время выполнения технологической операции, в результате которой на графе образовалась обратная дуга.

Граничные значения треугольных чисел, характеризующих трудозатраты, характерные обратным дугам, могут быть рассчитаны, исходя из соотношений:

$$f_{ji}^{NL}(\theta) = f_{ji}^N(\theta) - \frac{m_{ji}^{*обп}(\theta)}{\Pi_{ji}^N(\theta) + \Pi_{ji}^{NR}(\theta)}; f_{ji}^{NR}(\theta) = \frac{m_{ji}^{*обп}(\theta)}{\Pi_{ji}^N(\theta) - \Pi_{ji}^{NL}(\theta)} - f_{ji}^N(\theta).$$

Результаты исследования и их обсуждение. Для решения предложенной графической модели разработан алгоритм поиска потока минимальной стоимости, обоснования величины характерных для него затрат и расчета максимальных пропускных способностей путей между фиктивным источником и стоком в структуре предложенных графических моделей, отличающийся комплексным учетом двух основных характеристик технологического процесса лесосечных работ: производительности и трудозатрат, представленных в качестве пропускных способностей дуг графа. Отличительной особенностью предложенного графоаналитического подхода является то, что он представляет собой новый тип задач теории графов, в котором прохождение потока по отдельным дугам динамической операционной сети снижает пропускную способность дуг, характеризующих выполнение одноименных технологических операций анализируемого временного интервала.

Выводы. Предложенные в работе принципы построения и расчета растянутых во времени графоаналитических моделей операционной сети позволяют обосновать последовательность освоения лесосек и выполнения технологических операций в нечетких динамических природно-производственных условиях освоения лесного квартала, сократить технологические простои и повысить эффективность лесозаготовительных работ предприятия.

Список литературы

1. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The task of minimum cost flow finding in transportation networks in fuzzy conditions // Proceedings of the 10th International FLINS Conference Concept on Uncertainty Modeling in Knowledge Engineering and Decision Making Word Scientific, Istanbul, Turkey, 26-29 August 2012.- P. 354-359.
2. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Таганрог: Известия Южного федерального университета. Технические науки.- 2014.- № 5 (154). - С. 161-167.

3. Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженюк А.В. Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС// Таганрог: Известия Южного федерального университета. Технические науки.- 2012.-Т. 126. № 1.-С. 121-127.
4. Боженюк А.В. Принятие решений на основе нечеткой экспертной информации: Дис. докт. техн. наук. - Таганрог, 2001 - 285 с.
5. Боженюк А.В., Розенберг И.Н. Размещение центров обслуживания в ГИС на основе интервальных графов// Обозрение прикладной и промышленной математики -2007. - Т. 14. № 4.- С. 682-683.
6. Йенсен П., Бернес Д. Потокное программирование/ П. Йенсен, Д. Бернес – М.: Радио и связь, 1984 -392 с.
7. Рукомойников К. П. Графоалгоритмический подход к обоснованию рациональной технологии поквартального освоения участков лесного фонда// Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2014.- № S2.- С. 96-103.
8. Рукомойников К. П. Разработка программного обеспечения к созданию рациональной технологической карты поквартального освоения участков лесного фонда // М.Изд. МГУЛ, Вестник московского государственного университета леса "Лесной вестник"- 2013.- 3(95). – С. 159-166.
9. Рукомойников К.П. Обоснование методики расчета основных технологических параметров освоения квартала // Лесной вестник. - 2007. –№4(53), – С. 96-102.
10. Якимович С.Б., Тетерина М.А. Выбор систем заготовки древесины в условиях неопределенности //Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - 2008. - № 185.- С. 263-268.

Рецензенты:

Ширнин Ю.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ТОЛП, профессор, ФГБОУ ВПО Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., доцент, профессор ФГБОУ ВПО Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола.