

**АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВА**

преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

voronova\_am@petrsu.ru

**МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

piskunov\_mp@list.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСОСЕКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ ПУТЕЙ\*

Выявлены зависимости построения системы транспортных путей на лесосеке от состояния грунта и расположения погрузочного пункта на лесосеке. Приведено описание имитационного моделирования показателя категории грунта на лесосеке на основе генерации случайной величины с заданным законом распределения. Проведено исследование для выявления показателей, от которых зависит степень покрытия территории лесосеки системой транспортных путей и качество получаемой схемы волоков, рассчитанной специальным алгоритмом оптимизации. Сделаны выводы относительно выявленных закономерностей. Степень покрытия территории лесосеки не зависит от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, однако прослеживается зависимость степени покрытия от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки. Качество получаемых схем освоения лесосек, выраженное в значении целевой функции, зависит как от соотношения устойчивых и неустойчивых грунтов на лесосеке, так и от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Ключевые слова: свойства грунта, схема волоков, погрузочный пункт, покрытие территории, лесосека, зависимость

### ВВЕДЕНИЕ

Задача построения системы транспортных путей на лесосеке с учетом особенностей грунта и рельефа конкретной лесосеки и параметров трелевочного оборудования является актуальной [2], [4], [5], [8]. Она включает в себя две связанные подзадачи: выбор места размещения погрузочного пункта и построение связанной с ним схемы волоков.

Для решения задачи построена математическая модель лесосеки в виде гиперсети [1], [3], [6], [7], которая позволяет учитывать неравномерность произрастания леса на лесосеке, перепады высот вдоль линии движения трелевочного трактора, углы наклона при перемещении нагруженного трелевочного трактора, объем пачки древесины. Математическая модель позволяет регулировать количество поворотов трелевочного трактора и вводить запрещенные углы поворота при движении от места погрузки до погрузочного пункта.

Для построения системы транспортных путей на лесосеке разработан комплекс алгоритмов [1], [3], позволяющий находить место размещения погрузочного пункта на лесосеке и строить схему транспортных путей, покрывающую всю территорию лесосеки и учитывающую основные ограничения модели.

Целью исследования является выявление зависимостей показателей алгоритма построения системы транспортных путей: качества целевой функции построенных схем волоков и степени покрытия территории лесосеки схемой волоков – от исходных свойств грунта на лесосеке и от места размещения погрузочного пункта.

### МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Апробация моделей и алгоритмов проведена на данных, собранных в реальных условиях на территории Пряжинского района Республики Карелия, на данных из открытых публикационных источников. Ввиду большой сложности ручного сбора подробных данных, включающих данные о состоянии грунта, рельефа и плотности произрастания леса на лесосеке, предложен метод генерации основных параметров лесосеки псевдослучайным образом. Тестирование алгоритма построения схемы транспортных путей на лесосеке проведено с помощью имитационного эксперимента. В ходе эксперимента, результаты которого изложены в данной статье, проведена генерация показателя состояния грунта на лесосеке; два других показателя: плотность произрастания леса и перепады высот лесосеки – не сильно варьировались в пределах лесосеки небольшой размерности. Плотность произрастания леса принята постоянной, перепады высот – ну-

левые. Размер моделируемой лесосеки  $400 \times 300$  метров, который включает  $40 \times 30$  квадратных участков размером  $10 \times 10$  м. Кратко представим процесс имитационного эксперимента.

Моделируемая категория грунта является дискретной случайной величиной, которая может принимать 4 значения: 1 – текучий грунт, 2 – мягкопластичный, 3 – твердопластичный, 4 – твердый. Для категории грунта заданы частоты встречаемости значений категорий на лесосеке, например, участков с твердым грунтом на лесосеке 20% от общего числа участков, твердопластичных – 40%, мягкопластичных и текучих – по 20%. На первом этапе сгенерирована вспомогательная равномерно распределенная случайная величина, далее получено значение моделируемой категории грунта с заданными частотами встречаемости.

Испытания проведены на разных значениях частот распределения случайной величины категории грунта. В табл. 1 представлены варианты функции распределения случайной величины категории грунта.

Таблица 1  
Значения функции распределения случайной величины категории грунта

№	Функция распределения категории грунта			
	Твердый	Твердопласт.	Мягкопласт.	Мягкий
1	0,2	0,4	0,2	0,2
2	0,3	0,3	0,2	0,2
3	0,2	0,3	0,3	0,2
4	0,2	0,2	0,4	0,2
5	0,1	0,4	0,3	0,2

В ходе испытаний сгенерировано 10 лесосек с распределением категорий грунта вида № 1, № 2, № 3, № 4, № 5. Всего произведено 50 испытаний.

На выходе алгоритма получено визуальное представление лесосеки, где разными оттенками цвета окрашены участки лесосеки с разными свойствами грунта, помечен участок размещения погрузочного пункта, рассчитана и прорисована схема волоков на лесосеке, для которой толщиной линии (чем толще линия, тем глубже колея) выделены категории глубины колеи, образуемой после проезда трелевочной техники (рис. 1). Для лесосеки произведен расчет количества волоков по каждой категории глубины колеи, рассчитан процент обработанных участков лесосеки – это процент таких участков, с которых полностью собран и транспортирован лес до погрузочного пункта по построенной схеме волоков.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

**Исследование 1.** Алгоритм построения системы транспортных путей на лесосеке является приближенным и в общем случае может не выдавать 100% покрытия территории. Целью проведе-

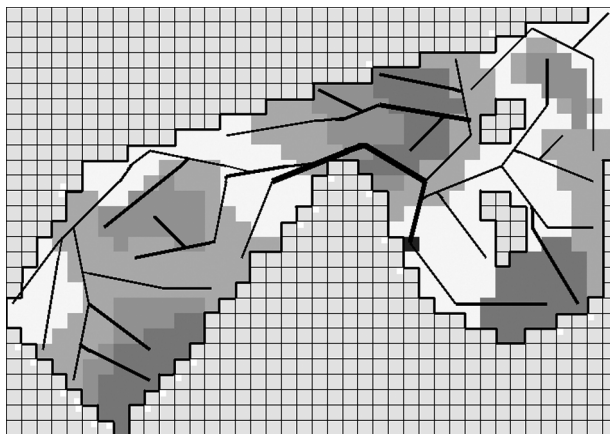


Рис. 1. Визуальное представление лесосеки с рассчитанной схемой волоков

ния испытаний является исследование алгоритма на параметр покрытия территории лесосеки для всех типов экспериментов.

**Вывод.** Процент обработанных участков лесосеки, с которых полностью собран и транспортирован лес до погрузочного пункта, не зависит от распределения категорий грунта. На рис. 2 видно, что графики количества обработанных участков для лесосек с распределениями разных видов перекрывают друг друга, расположены скученно. Для 95% всех испытаний процент сбора древесины принимает значение в диапазоне от 80 до 93%. Минимальное значение 77% зарегистрировано на лесосеке с категорией распределения № 2. Максимальное распределение 93,5% также зарегистрировано на лесосеке с категорией распределения № 2. Среднее значение процента сбора древесины для всех лесосек составляет 87,4%.

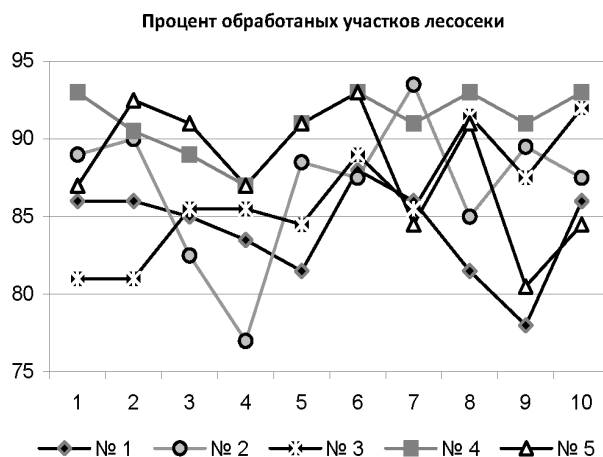


Рис. 2. Количество (%) обработанных участков для лесосек с распределением вида № 1–5

**Исследование 2.** Целью исследования является изучение влияния размещения погрузочного пункта на основной параметр покрытия территории лесосеки алгоритмом.

**Вывод.** Процент обработанных участков лесосеки зависит от расположения погрузочного пункта на территории лесосеки. Для рассматриваемой конфигурации лесосеки прямоугольной формы размерами  $40 \times 30$  элементарных участков в ходе испытаний было обнаружено несколько наилучших точек, пригодных для расположения погрузочного пункта и обеспечивающих наибольший сбор древесины с территории лесосеки. Сбор пачки древесины осуществляется с нескольких участков лесосеки. В рассматриваемых примерах для формирования полной пачки древесины необходимо от 9 до 11 элементарных участков лесосеки. Поэтому расположение погрузочного пункта влияет на возможные варианты объединения элементарных участков в области, которые обеспечивают полную рейсовую нагрузку трелевочного трактора. И, наоборот, при неудачном выборе места размещения погрузочного пункта возможно появление небольших областей лесосеки, трудно доступных для прокладки волоков в связи с недостаточным запасом древесины для формирования полной пачки древесины.

При проведении испытаний в 14 случаях из 50 (0,28 – доля испытаний от общего числа) место расположения погрузочного пункта установлено не в выделенных наилучших точках. Назовем такие испытания испытаниями типа А. В 36 испытаниях из 50 (0,72 – доля испытаний от общего числа испытаний) место расположения погрузочного пункта установлено в одной из выделенных точек. Назовем такие испытания испытаниями типа В. Для испытаний типа А минимальный, максимальный и средний проценты сбора ниже, чем для испытаний типа В. В табл. 2 представлены минимальный, максимальный и средний проценты для испытаний типа А и В.

Таблица 2  
Проценты для испытаний типа А и В

	Испытания А	Испытания В
1. Доля испытаний от общего числа	0,28	0,72
2. Минимальный процент сбора, %	77	78
3. Максимальный процент сбора, %	88	93,5
4. Средний процент сбора, %	83,57	88,83

Из табл. 2 видно, что для испытаний, в которых погрузочный пункт расположен в одной из возможных наилучших точек для данной конфигурации лесосеки, получены большие параметры сбора древесины с территории лесосеки.

**Исследование 3.** Целью исследования является изучение зависимости качества получаемой системы транспортных путей от соотношения устойчивых и неустойчивых грунтов.

**Вывод.** Целевая функция – количество волоков для категорий глубины колеи (критической,

недопустимо глубокой, глубокой, рекомендуемой) – зависит от распределения свойств грунта на лесосеке. Чем больше соотношение категорий грунта в пользу твердых и твердопластичных грунтов, тем меньше по количеству волоков с критической, недопустимо глубокой и глубокой колеи.

Если объединить волоки с критической, недопустимо глубокой и глубокой колеи в одну группу волоков с нерекомендуемой колеи и сравнить между собой количественные значения по всем видам распределения категорий грунта на диаграмме (рис. 3), то выделяется распределение категорий грунта № 4, для которого характерно наибольшее количество волоков с нерекомендуемой колеи по всем испытаниям. Для лесосек вида № 4 соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов составляет 60 % : 40 %, то есть преобладают неустойчивые грунты. Кроме того, видно, что лесосеки с распределением категорий грунта № 1 и 2 (соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов 60 % : 40 %) имеют схожие показатели друг с другом, как и лесосеки с распределением категорий грунта № 3 и 5 (соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов 50 % : 50 %).

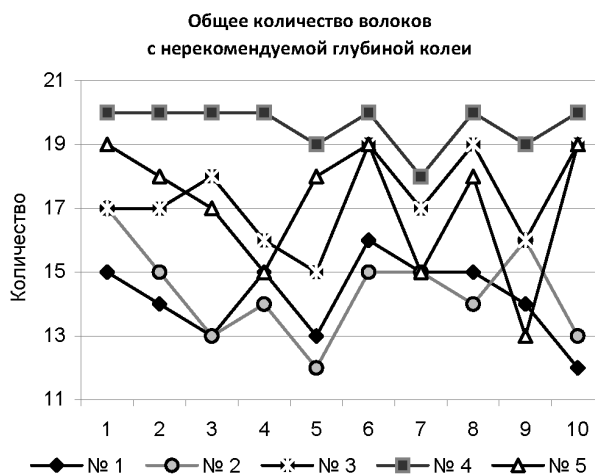


Рис. 3. Общее количество волоков с нерекомендуемой глубиной колеи для испытаний вида № 1–5

**Исследование 4.** Данный эксперимент нацелен на изучение зависимости качества получаемой системы транспортных путей на лесосеке от места размещения погрузочного пункта.

**Вывод.** Количество волоков с недопустимой глубиной колеи (критической, недопустимо глубокой), входящих в состав целевой функции, зависит не столько от категории грунта в непосредственном месте расположения погрузочного пункта, сколько от подъездов к данному погрузочному пункту, то есть наличия или отсутствия твердых участков, расположенных вблизи от погрузочного пункта, по которым осуществляется транспортировка основного потока древесины.

Этот вывод обуславливает необходимость тщательного изучения свойств грунта на лесосеке перед началом лесозаготовительных работ. Недостаточно в ходе подготовительных работ на лесосеке определить участок лесосеки с твердым грунтом для размещения погрузочного пункта. Важно определить возможные подъезды к погрузочному пункту, так как именно по ним будет осуществляться основной проезд техники, в случае же отсутствия таких подъездов неизбежно образование глубокой колеи при проведении трелевочных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сформулированы четыре основных вывода, полученных в ходе тестирования алгоритма построения системы транспортных путей на лесосеке. Выводы касаются выявленных зависимостей основных показателей полученных схем волоков – количества обработанных участков лесосеки и количества волоков с разными категориями образованной колеи от места

размещения погрузочного пункта на лесосеке и от исходного распределения свойств грунта на лесосеке.

Процент покрытия участков лесосеки не зависит от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, что подтверждает устойчивость работы алгоритма от входных данных. Процент покрытия участков лесосеки зависит от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Качество получаемых схем освоения лесосек (целевая функция) зависит как от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, так и от размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Заметим, что в процессе лесозаготовительных работ исходное состояние грунта на территории лесосеки не может быть улучшено. В этой связи важной задачей остается выбор места размещения погрузочного пункта для получения качественной и полной покрывающей сети на территории лесосеки.

\* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 114–117.
2. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А., Васильев В. Н. Распределение проходов по длине волока и расчет рейсовых нагрузок трелевочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77 (03) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/43.pdf>
3. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А., Щеголева Л. В. Алгоритм оптимального размещения волоков из условия минимизации повреждения грунта // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 9. С. 33–35.
4. Григорьев И. В., Жукова А. И. Пути совершенствования технологических процессов лесосечных работ на северо-западе Российской Федерации // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГТУ, 2009. С. 19.
5. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
6. Попков В. К. Математические модели и методы оптимизации городских транспортных систем // Материалы 2-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономические приложения». Омск, 2009. С. 80–81.
7. Попков В. К., Токтошов Г. Ы. Гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей в горной или пересеченной местности // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. С. 276–282.
8. Салминен Э. О., Гуров С. В., Большаков Б. М. Размещение волоков на заболоченных лесосеках // Лесная промышленность. 1988. № 3. С. 3.

Voronova A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Piskunov M. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## MODELING OF CUTTING AREA PARAMETERS FOR ALGORITHM TESTING OF TRANSPORT ROUTES' NETWORK CONSTRUCTION

The article reveals existing dependences of the transport routes' network construction in the cutting area from the soil properties and location of the upper landing on the cutting area. A description of the imitating modeling of the soil properties' indicators in the cutting area is given on the basis of the random variables' generation with the specified distribution law. The study was conducted to identify indicators that determine a degree of the cutting area cover by the transport routes' network and the quality of obtained skid trails. The quality was calculated by a special algorithm of optimization. The obtained conclusions provide findings regarding identified dependencies. The cover for the cutting area does not depend on the initial distribution of soil properties in the cutting area. It depends on the upper landing location on the territory of the cutting area. The quality of the skid trail network, expressed in the value of the objective function, depends on the ratio of stable and unstable soils in the cutting area and on the upper landing location on the territory of the cutting area.

Key words: soil properties, skid trail network, upper landing, cover for area, cutting area, dependence

## REFERENCES

1. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. Modeling of skid trail network by covering hypernetwork by covering hypernetwork by weighted root tree [Modelirovanie skhemy volokov pri pomoshchi pokrytiya giperseti vzveshennym kornevym derevom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 2 (123). P. 114–117.
2. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A., Vasil'ev V. N. Distribution of passages along the length of the skid trail and calculation of voyage skidder loads when driving on soils with low bearing capacity on the example of whiplash logging technology [Raspredelenie prokhodov po dline voloka i raschet reysovykh nagruzok trelevochnogo traktora pri dvizhenii po gruntam s nizkoy nesushchey sposobnost'yu na primere khlystovoy tekhnologii zagotovki lesa]. *Nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]. 2012. № 77 (03). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/43.pdf>
3. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A., Shchegoleva L. V. The algorithm for optimal location of skid trail network to minimize damage of the soil properties [Algoritm optimal'nogo razmeshcheniya volokov iz usloviya minimizatsii povrezhdeniya grunta]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machines]. 2013. № 9. P. 33–35.
4. Grigor'ev I. V., Zhukova A. I. Ways of improving the process of logging operations in the north-west of the Russian Federation [Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh protsessov lesosechnykh rabot na severo-zapade Rossiyskoy Federatsii]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of forest sector development: proceedings of the international scientific conference]. Vologda, VoGTU Publ., 2009. P. 19.
5. Grigor'ev I. V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trelevochnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reduction of negative impact on soil caused by wheeled skidders and rationale for regimes of motion and process equipment]. St. Petersburg, SPbGLTA Publ., 2006. 236 p.
6. Popkov V. K. Mathematical models and methods of optimization the city transport systems [Matematicheskie modeli i metody optimizatsii gorodskikh transportnykh sistem]. *Materialy 2-y Vserossiyskoy konferentsii "Problemy optimizatsii i ekonomicheskie prilozheniya"* [Proceedings of the 2nd National Conference «Problems of optimization and economic applications»]. Omsk, 2009. P. 80–81.
7. Popkov V. K., Toktoshov G. Y. Hypernetwork optimization technology for engineering networks in mountainous and rugged terrain [Gipersetevaya tekhnologiya optimizatsii inzhenernykh setey v gornoy ili peresechennoy mestnosti]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Buryat State University]. 2010. № 9. P. 276–282.
8. Salminen E. O., Gurov S. V., Bol'shakov B. M. Accommodation of skid trails in waterlogged cutting areas [Razmeshchenie volokov na zabolochennykh lesosekakh]. *Lesnaya promyshlennost'* [Timber industry]. 1988. № 3. P. 3.

Передана в редакцию 07.04.2014