

УДК 630.3

Статья

Оценка экономической эффективности систем машин для производства топливной щепы в Республике Карелия

Юрий В. Суханов^{1,*}, Антон П. Соколов¹ и Юрий Ю. Герасимов²

¹ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, 185910 Петрозаводск, Россия; E-Mails: yurii_ptz@bk.ru (Ю.В.С.); a_sokolov@petsu.ru (А.П.С.)

² НИИ леса Финляндии Metla, П.Я. 68, 80101 Йоэнсуу, Финляндия; E-Mails: yuri.gerasimov@metla.fi

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: yurii_ptz@bk.ru;
Tel.: +7(814-2) 57-03-26; Fax: +7(814-2) 57-03-26.

Получена: 4 марта 2013 / Принята: 2 мая 2013 / Опубликована: 11 мая 2013

Аннотация: Россия имеет значительные объемы древесной биомассы различного происхождения, которые доступны для производства биоэнергии, но энергетическая древесина все еще широко не используется в качестве топлива. В Республике Карелия с использованием разработанной системы поддержки принятия решений были сопоставлены четыре технологии по производству топливной щепы. Были определены наиболее целесообразные системы машин для производства топливной щепы для условий местного рынка. Производство щепы из лесосечных отходов является экономически эффективным, если расстояние до котельной составляет не более 50 км. Использование низкокачественной древесины для производства топливной щепы, по сравнению с использованием лесосечных отходов, является более экономически целесообразным. В этом случае топливную щепу можно доставлять с лесосек, находящихся на расстоянии до 150 км. Возможность использования лесосечных отходов в значительной степени зависит от несущей способности грунта на лесосеках. В условиях Республики Карелия производство щепы с использованием систем машин, предусматривающих измельчение древесной биомассы у котельной, имеет наилучшую экономическую эффективность.

Ключевые слова: древесная биомасса; топливная щепа; рубительная машина; форвардер; пакетирующая машина; имитационное моделирование; ГИС

Article

Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Karelia

Yuri V. Sukhanov^{1,*}, Anton P. Sokolov¹ and Yuri Y. Gerasimov²

¹ Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; E-Mails: yurii_ptz@bk.ru (Y.V.S.); a_sokolov@petrsu.ru (A.P.S.)

² Finnish Forest Research Institute Metla, P.O. Box 68, 80101 Joensuu, Finland; E-Mails: yuri.gerasimov@metla.fi

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: yurii_ptz@bk.ru;
Tel.: +7(814-2) 57-03-26; Fax: +7(814-2) 57-03-26.

Received: 4 March 2013 / Accepted: 2 May 2013 / Published: 11 May 2013

Abstract: Russia has significant volumes of woody biomass of different origins that are available for energy, but wood is not widely used as fuel. Four alternatives of forest chip supply systems were compared in the Republic of Karelia with the support system and the most favorable methods of wood chip production were determined by the local market conditions. The collection of logging residues for chipping is cost-effective if the distance to the customer is less than 50 km. The use of round energy wood for the production of forest chips compared with the use of logging residues is more economically feasible. In this case, forest chips can be transported up to 150 km. The availability of logging residues largely depends on the load-bearing capacity of the soil at harvesting sites. When considering the local market, a production method based on chipping energy wood at the end user facility has the best economic efficiency.

Keywords: woody biomass; fuel chips; chipper; forwarder; bundler; simulation; GIS

1. Введение

Северо-Западная часть России располагает значительными объемами энергетической древесины различного происхождения. Технически доступно для использования около 30 млн. пл. м³ энергетической древесины, включая низкосортную древесину, лесосечные отходы, пни и отходы деревообработки [1]. Несмотря на большие ресурсы энергетической древесины, она далеко не полностью используется на Северо-Западе России в качестве топлива. Древесина вместе с другими возобновляемыми источниками энергии обеспечивает только 2% от общего потребления энергии на Северо-Западе России. Несколько факторов ограничивают местное использование энергетической древесины. В первую очередь это быстрое расширение национальной газотранспортной сети. Также наблюдается нехватка инвестиций и оборудования для производства и использования биотоплива из древесной биомассы. Более того, на развитие энергетики, основанной на древесине, оказывает влияние государственная энергетическая политика. Действующая энергетическая стратегия России делает приоритетом интенсификацию производства энергии из других возобновляемых источников энергии, в основном, с помощью гидроэлектростанций [2].

Однако, поставки энергетической древесины имеют коммерческий потенциал во многих регионах Северо-Запада России, что объясняется двумя факторами. Растущий глобальный спрос на пеллеты стимулирует производство биотоплива из древесной биомассы на Северо-Западе России. Другой причиной увеличения коммерческого потенциала энергетической древесины являются политические меры, предпринимаемые в некоторых регионах Северо-Запада России [2,3]. Эти регионы разрабатывают или уже выполняют (Архангельская область, Республика Карелия, Новгородская и Вологодская области) стратегии развития, направленные на увеличение использования древесины для производства энергии. Несмотря на различные цели, региональные стратегии обладают общими особенностями, а именно, они предусматривают более широкое применение местного биотоплива, что указывает лесозаготовительным компаниям, производителям и потребителям биотоплива на перспективы использования энергетической древесины. Более того, выполнение стратегий должно привести к росту местного спроса на энергетическую древесину, которая может быть ресурсом для производства различных видов древесного биотоплива. Это позволит получить рынок энергетической древесины и даст возможность лесозаготовительным компаниям реализовывать все объемы низкосортной древесины.

В то же время переизбыток низкосортной древесины является причиной, по которой топливная щепка, один из наиболее распространенных видов топлива, производимого из энергетической древесины в регионе, имеет низкую стоимость на местном рынке. Это усложняет выбор эффективной цепочки поставки топливной щепки.

Значительные объемы технически доступной энергетической древесины и слабый внутренний спрос, а также близость к потребителям Финляндии, создают возможности для производства и экспорта топливной щепки из Северо-Западного региона в Финляндию. Однако, стоимость транспортировки топливной щепки ограничивает территорию снабжения. Экономически эффективной, при экспорте топливной щепки из Республики Карелия в

Финляндию, является цепочка поставки, основанная на производстве топливной щепы из круглой древесины на нижнем складе (терминале) с помощью мобильной рубительной установки [4].

Эффективность производства биотоплива из древесной биомассы зависит от многих факторов [5-11], включая затраты на транспортировку энергетической древесины от лесосек к нижнему складу (терминалу), расстояние транспортировки топливной щепы и время, необходимое на погрузочно-разгрузочные операции, пересечение российско-финляндской границы (при экспорте щепы), качество щепы и др.

В настоящее время эффективное производство биотоплива из древесной биомассы невозможно без применения современных высокопроизводительных машин. Такая техника имеет высокую стоимость, и её покупка должна быть обоснована. Дополнительной проблемой является то, что цена на щепу в России держится на достаточно низком уровне, а затраты на сбор и трелевку древесной биомассы, переработку в щепу и доставку до потребителя велики.

Для выбора эффективной технологии производства древесного топлива предлагается применить систему поддержки принятия решения [12-16], которая позволяет рассмотреть несколько вариантов систем машин, сравнить результаты по вариантам. Целью настоящей работы является поиск ответов на следующие вопросы: какие технологии и системы машин целесообразнее применять при использовании лесосечных отходов и низкосортной древесины в качестве сырья для производства топливной щепы в природно-производственных условиях Республики Карелия; какая минимальная цена на щепу должна быть предложена потребителем, чтобы сбор лесосечных отходов и производство щепы из низкосортной древесины были экономически выгодным мероприятием.

2. Материалы и методы

Система поддержки принятия решения включает в себя имитационную модель лесосечной делянки и условий работы, имитационные модели работы лесных машин и программу, позволяющую оценить целесообразность сбора лесосечных отходов и переработки их в щепу в заданных пользователем условиях. Отличительной особенностью системы является то, что сбор лесосечных отходов рассматривается совместно с заготовкой древесины.

Для работы с пространственной информацией и получения возможности работы с данными, связанными с картами ГИС, в модели делянки используется язык MapBasic из пакета программного обеспечения MapInfo. Модели машин и программа расчета экономической эффективности, для ускорения расчетов, реализованы на языке программирования C++ с применением Borland Builder и инструментария Qt.

Имитационная модель лесосечной делянки и условий работы позволяет генерировать горизонтальную и вертикальную структуры древостоя, углы наклона технологических коридоров в продольном и поперечном направлениях, глубину снежного покрова, влажность грунта, а также температуру окружающего воздуха и скорость ветра (Рис. 1).

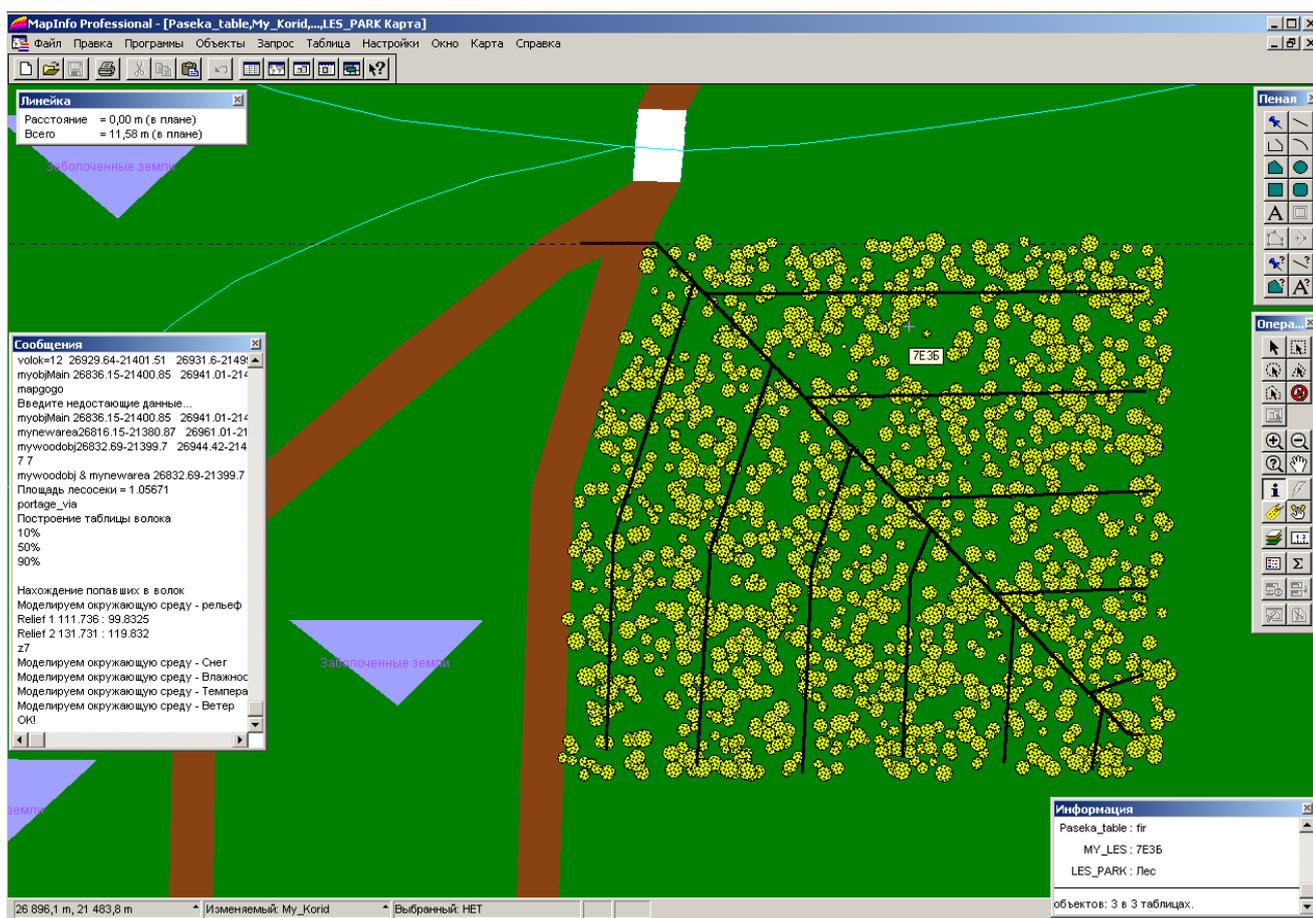


Рисунок 1. Внешний вид окна программы MapInfo при моделировании лесосеки.

Исходными данными для работы моделей лесных машин являются характеристики сгенерированной модельной лесосечной делянки и характеристики имитируемой лесозаготовительной машины. В основе модели лесных машин лежат несколько алгоритмов, выполняемых в цикле, позволяющих реализовать выбор следующей технологической стоянки, передвижение машины по волоку и обработку дерева (пачки сортиментов, кучи или пакета лесосечных отходов).

Имитационные модели лесных машин позволяют рассчитать объем произведенной работы, время работы, а также часовую производительность машин при работе на модельной лесосечной делянке. Для машин, оснащенных манипулятором, на который навешена харвестерная головка, часовая производительность ($\Pi_{ч}$) будет находиться по формуле [17]:

$$\Pi_{ч} = \frac{3600 \cdot Q_{all}}{T_{all}} = \frac{3600 \cdot \sum_{j=1}^{N_{pov}} Vbm_j}{\sum_{k=1}^{N_{st}} (tdd_k + t_{pp}) + \sum_{i=1}^{N_p} \left(\sum_{j=1}^{N_d} (t_{d1} + t_{d2} + t_{d3})_j + t_p + t_y \right) + t_{bk}}, \quad (1)$$

где

Q_{all} – суммарный объем биомассы, полученной при валке и обработке тонкомерных деревьев на лесосечной делянке, м³;

T_{all} – время, затраченное на разработку лесосечной делянки, с;

$N_{пов}$ – количество поваленных и обработанных деревьев, шт;

Vbm_j – объем биомассы j -го поваленного дерева, м³;

N_{st} – количество технологических стоянок;

tdd_k – время, затраченное на движение к k -той технологической стоянке, с;

t_{pp} – время для перехода в походное положение, с;

N_p – количество пачек деревьев, набранных с места стоянок;

N_d – количество деревьев в i -той пачке (в зависимости от возможности накопителя);

t_p – время, затраченное на перемещение пачки в конечную точку, с;

t_y – время, затраченное: на укладку пачки для харвестера, направление пачки в пакующее устройство для машины-упаковщика, направление пачки в рубительный модуль для комби-машины и удержание её там, с;

t_{d1} – время, затраченное машиной на наведение на j -е дерево, с;

t_{d2} – время, затраченное машиной на захват j -го дерева, с;

t_{d3} – время, затраченное машиной на валку j -го дерева, с;

t_{bk} – время, затраченное машиной для возврата на погрузочную площадку у дороги (верхний склад) после окончания работы, с.

Время, затраченное машиной по основным технологическим операциям и на передвижение, рассчитывается при обработке каждого модельного дерева (пачки сортиментов, кучи или пакета лесосечных отходов). При этом учитывается возможность захвата дерева по доступности, грузовому моменту манипулятора и по устойчивости машины. Учитывается скорость манипулятора, производительность пильного и протаскивающего механизмов. При моделировании учитывается влияние машин на окружающую среду: рассчитывается глубина колеи, уплотнение грунта, а также повреждения оставляемых на дорастивание деревьев при выборочной рубке.

Модели (Рис. 2) позволяют имитировать работу харвестера на лесосечной делянке (как с колесным, так и гусеничным движителем), форвардера (на трелевке сортиментов, пакетов лесосечных отходов и насыпных лесосечных отходов), мобильной рубительной машины и машины, пакетирующей лесосечные отходы.

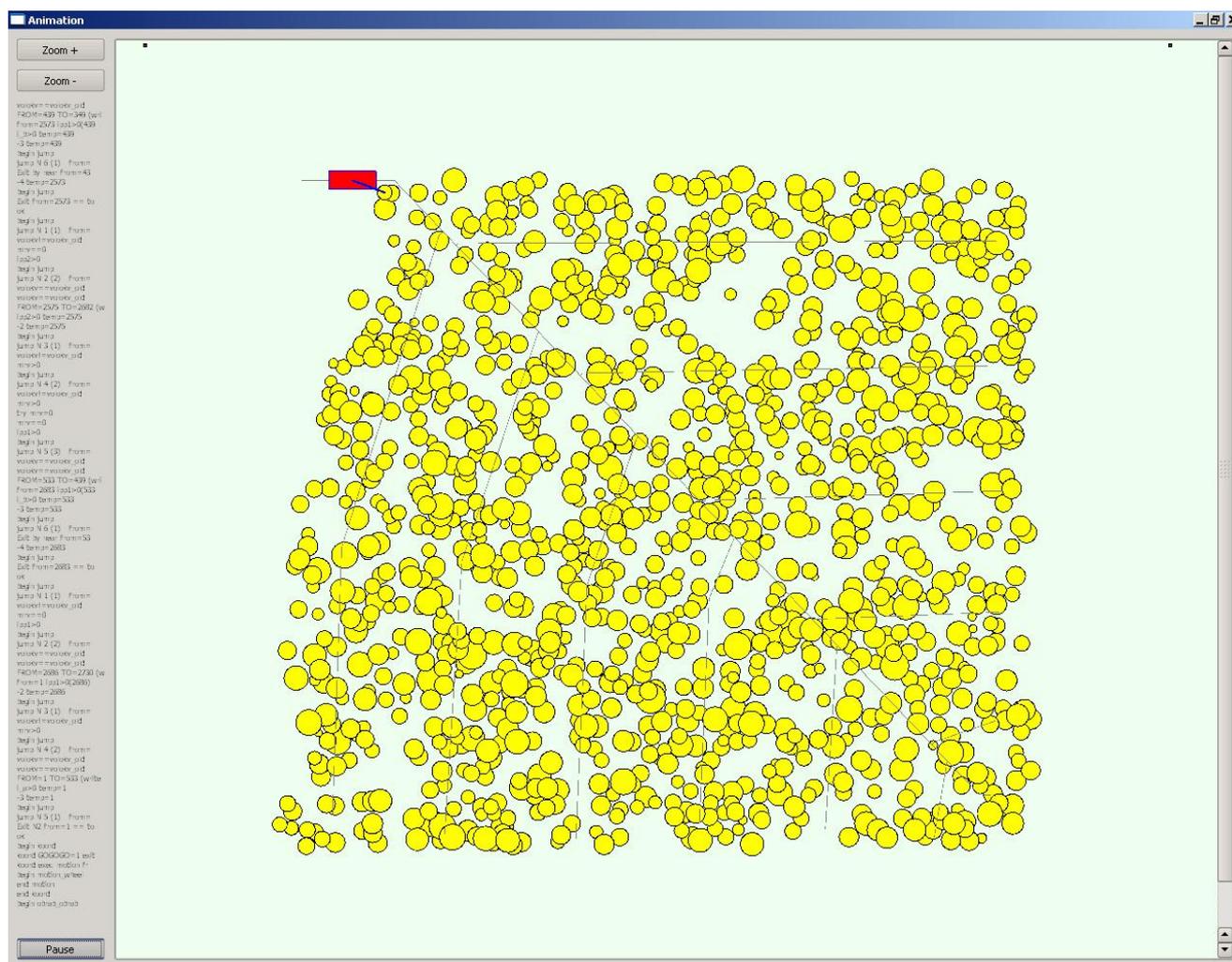


Рисунок 2. Внешний вид окна программы при моделировании работы харвестера.

Основными исходными данными для программы расчета экономической эффективности (Рис. 3) являются результаты имитационного моделирования работы лесных машин при сборе и переработке лесосечных отходов. Программа учитывает объем собранных лесосечных отходов и дровяной древесины, а также время работы машины в часах. Кроме этого, пользователь должен ввести данные, необходимые для расчета постоянных и переменных затрат на работу машины, задать цены на продукцию лесной отрасли, указать затраты на уборку лесосечной делянки.

Имитационные модели и программа расчета экономической эффективности позволяют произвести расчеты для базового варианта (без заготовки лесосечных отходов) и трех вариантов технологий заготовки биотоплива с использованием лесосечных отходов в качестве источника сырья, а также рассчитать и сравнить между собой варианты технологий получения топливной щепы из низкосортной древесины (Табл. 1).

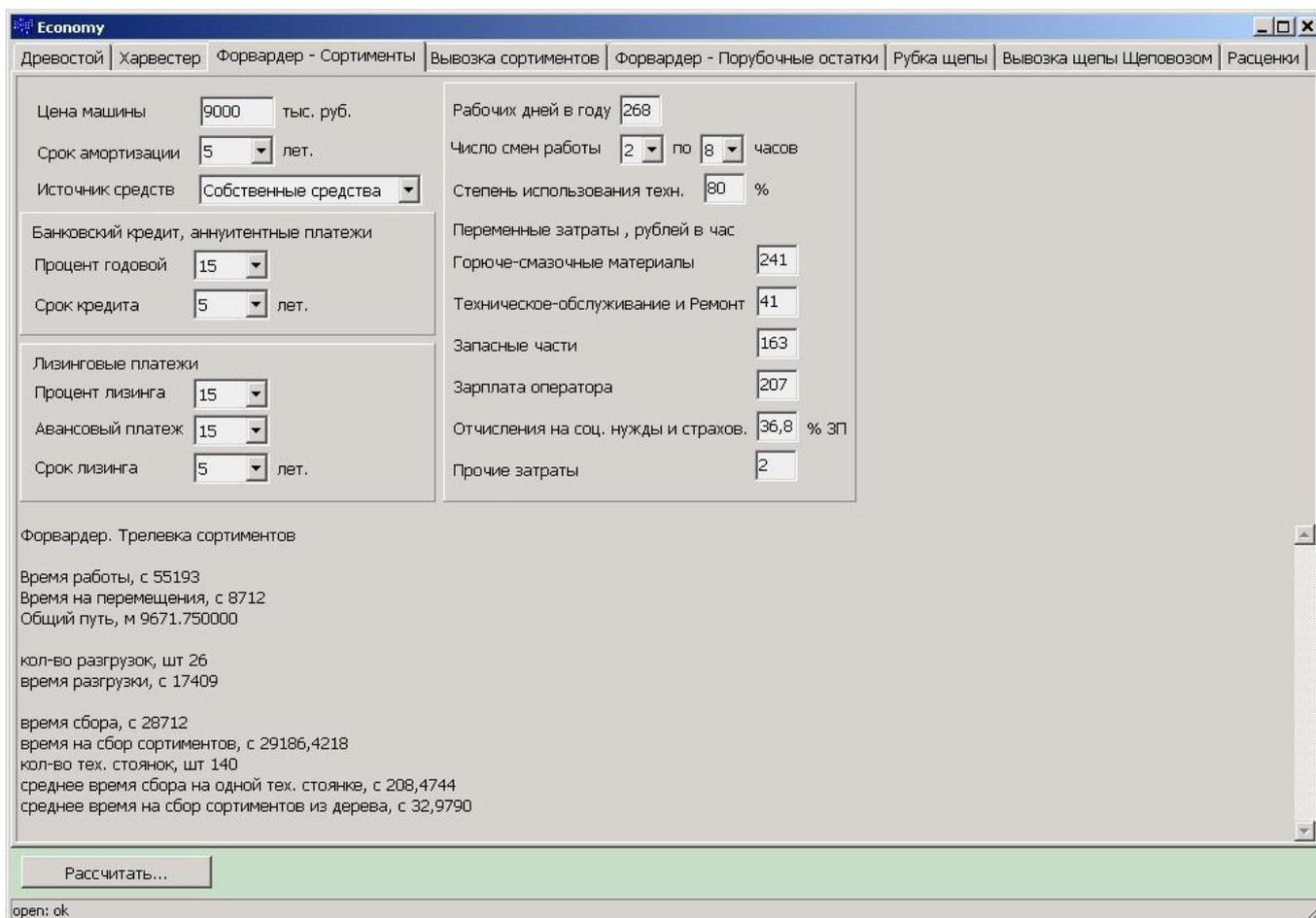


Рисунок 3. Внешний вид окна программы расчета экономической эффективности.

Таблица 1. Варианты технологий и систем машин

Источник биомассы	Лесосечная делянка (у пня)	Погрузочная площадка у дороги (верхний склад)	Потребитель
Базовый вариант			без сбора лесосечных отходов
Первый вариант			
Второй вариант			
Третий вариант			
Низкосортная древесина - 1			
Низкосортная древесина - 2			

В качестве *базового* предлагается вариант без сбора лесосечных отходов и без получения топливной щепы. При этом расходы на очистку мест рубок, вместе с затратами на валку с трелевкой и вывозку, будут влиять на рентабельность лесозаготовок. Доход лесозаготовитель может получить от реализации деловой и низкосортной древесины.

Первый вариант — сбор лесосечных отходов и трелевка их на погрузочную площадку у дороги (верхний склад) с помощью форвардера, рубка лесосечных отходов в щепу передвижной рубительной машиной и вывозка автомобилем-щеповозом. Рубительная машина может загружать щепу непосредственно в автомобиль-щеповоз или отсыпать в конус. В последнем случае для погрузки щепы может применяться фронтальный ковшевый погрузчик. При этом варианте в качестве расходов необходимо рассматривать затраты на валку деревьев, трелевку сортиментов, вывозку сортиментов, сбор лесосечных отходов и их трелевку, переработку в щепу рубительной машиной, транспортировку щепы к потребителю. Доход складывается из реализации деловой древесины, топливной щепы и уменьшения расходов на очистку мест рубок после заготовки древесины.

Второй вариант рассматривает применение при сборе лесосечных отходов пакетирующей машины. В этом варианте потребителю доставляется не щепы, а плотно обвязанные пакеты лесосечных отходов. При этом в качестве расходов необходимо рассматривать затраты на валку деревьев, трелевку сортиментов, вывозку сортиментов, затраты на работу пакетирующей машины, вывозку пакетов форвардером и затраты на доставку пакетов лесовозным транспортом до потребителя. Доход складывается из реализации деловой древесины, пакетов лесосечных отходов и уменьшения расходов на очистку мест рубок после заготовки древесины.

Третий вариант базируется на применении мобильной рубительной машины на базе форвардера с контейнером. При этом в качестве расходов необходимо рассматривать затраты на валку деревьев, трелевку сортиментов, вывозку сортиментов, затраты на работу мобильной рубительной машины и транспортировку щепы с помощью автомобилей-щеповозов. Доход складывается из реализации деловой древесины, топливной щепы и уменьшения расходов на очистку мест рубок после заготовки древесины.

После сравнения расчетов по разным технологиям и разным системам машин, можно сделать вывод о целесообразности заготовки щепы из лесосечных отходов и выбрать оптимальную систему машин и модели машин для заданных природно-производственных условий. Варьируя исходными данными, можно найти границы применения того или иного варианта, определить слабые стороны систем машин.

При реализации заготовки щепы по первому варианту положительным моментом является необходимость приобретения сравнительно недорогой специализированной техники. Стоимость рубительной машины с приводом от вала отбора мощности и сельскохозяйственного трактора в несколько раз ниже стоимости специализированных пакетирующих машин и мобильных рубительных машин на базе форвардера. Сбор лесосечных отходов на лесосеке может производиться тем же форвардером, который трелюет сортименты. Необходимо учитывать, что в России ярко выражена сезонность лесозаготовок.

Основной объем лесозаготовок приходится на зимние месяцы [18], летом коэффициент использования форвардеров может опускаться до 0,6 и ниже. Это связано с тем, что в российских лесах доминируют суглинистые и глинистые почво-грунты. На таких почвах системы машин для сортиментной заготовки формируют значительную колею [19]. При трелевке же легких лесосечных отходов колея нарезается меньше. Возможность частичного использования форвардеров в летние месяцы на сборе лесосечных отходов может, с одной стороны, увеличить коэффициент использования техники, а с другой стороны, значительно снизить себестоимость заготовки щепы за счет снижения постоянной составляющей затрат на работу машины по трелевке лесосечных отходов с делянки. При снижении цен на щепу или при увеличении затрат на переработку лесосечных отходов в щепу, форвардеры можно задействовать на рубках деловой древесины, а рубительную машину использовать только на переработке в щепу дровяной древесины.

Отличительной особенностью второго варианта является применение дорогостоящей и производительной специализированной машины для пакетирования лесосечных отходов. Для того, чтобы пакетирующая машина окупалась и приносила доход, необходимо максимально полно использовать возможности машины, а значит, необходимы большие объемы заготовки древесины. Также необходим постоянный спрос на пакеты лесосечных отходов со стороны потребителя. Положительным моментом данной технологии является возможность транспортировки пакетов обычным лесовозным транспортом, что дешевле [20] транспортировки щепы в специализированных машинах – щеповозах, в основном, из-за малой насыпной плотности щепы, более эффективной погрузки и разгрузки пакетов лесосечных отходов гидроманипулятором и более высокой стоимости щеповоза. Кроме этого, возможность применения лесовозов повышенной проходимости может позволить вывезти пакеты по дорогам, недоступным средним и тяжелым щеповозам.

В третьем варианте также применяется дорогостоящая специализированная мобильная рубительная машина, для использования которой необходим постоянный спрос на щепу и большие объемы заготовки древесины. Положительной стороной является минимизация количества единиц техники в цепочке: необходимы только мобильная рубительная машина и щеповоз. С учетом небольших объемов контейнеров на мобильной рубительной машине более эффективным следует признать трелевку форвардером низкосортной древесины и немерных отрезков совместно с деловой древесиной с последующей переработкой рубительной машиной этой древесины в щепу уже на погрузочной площадке.

При решении вопроса о целесообразности сбора лесосечных отходов и переработки их в щепу необходимо учитывать, что из-за низкой несущей способности грунтов не на всех лесосеках возможен сбор лесосечных отходов. При сборе и вывозке лесосечных отходов значительно повышается количество проходов техники по волокам. А на грунтах с низкой несущей способностью лесосечные отходы приходится использовать на укрепление волоков. При этом, лесосечные отходы с волоков не могут использоваться для производства щепы в связи с тем, что они загрязнены грунтом, а это не только повышает зольность будущей топливной щепы, но также увеличивает вероятность повреждения крупными минеральными

включениями ножей рубительной машины. Количество проходов техники по одному и тому же месту волока будет зависеть от выбранной технологии и характеристик машин в системе.

Кроме этого необходимо учитывать, что при вывозе лесосечных отходов с погрузочной площадки до потребителя дополнительные нагрузки получают и лесовозные дороги из-за прохода автомобилей и необходимости доставки специализированной техники до лесосеки.

В связи с этим необходимо исключить сбор лесосечных отходов с лесосек с низкой несущей способностью грунтов (лесосечные отходы в этом случае идут на укрепление волока), а также с тех лесосек, где лесовозные дороги не могут обеспечить возможность доставки по ним готового биотоплива или биомассы до потребителя.

Также следует исключить сбор лесосечных отходов на лесосеках с бедными почвами, где наблюдается недостаток питательных веществ [21]. Удаление с таких лесосек ветвей и сучьев не желательно.

Описанные выше имитационные модели позволяют производить расчеты эффективности систем машин при получении топливной щепы только из низкосортной древесины, без использования лесосечных отходов.

В этом случае наиболее перспективны следующие два варианта.

Вариант получения щепы из топливной древесины на погрузочной площадке. В этом случае топливная древесина перерабатывается рубительной машиной в щепу и транспортируется потребителю с помощью автомобилей-щеповозов.

Другим вариантом будет получение щепы непосредственно у потребителя. В этом случае стрелеванная форвардером на погрузочную площадку низкосортная древесина перегружается на автомобили-сортиментовозы и вывозится к потребителю. У потребителя низкосортная древесина перерабатывается в щепу мощной передвижной или стационарной машиной.

С помощью описанных моделей было проведено моделирование лесозаготовок и сделаны предварительные расчеты экономической эффективности систем машин по двум разным лесосечным деланкам. Рассчитывалась себестоимость 1 плотного м³ топливной щепы.

Характеристики лесосечных деланок сведены в Табл. 2.

Таблица 2. Характеристики модельных лесосечных деланок

Лесосечная деланка	Формула насаждения	Возраст насаждения, лет	Бонитет насаждения	Запас на гектар, м ³	Среднее расстояние трелевки, м
1	7ЕЗБ	80	4 бонитет	170	200
2	7ЕЗБ	100	3 бонитет	260	200

Имитационное моделирование проводилось для климатических условий юга Карелии, местность – равнинная, рубки – сплошнолесосечные.

3. Результаты

По результатам предварительных расчетов были получены диаграммы структуры затрат в себестоимости щепы из лесосечных отходов (Рис. 4 и Рис. 5) и зависимость себестоимости щепы от расстояния до потребителя (Рис. 6 и Рис. 7). Для удобства ориентирования красной линией на диаграммах указана цена одного плотного м³ щепы в 740 рублей (18,13 евро), взятая как среднеконтрактная цена (FCA) на топливную щепу из хвойных пород по Республике Карелия за 2010 год [22].

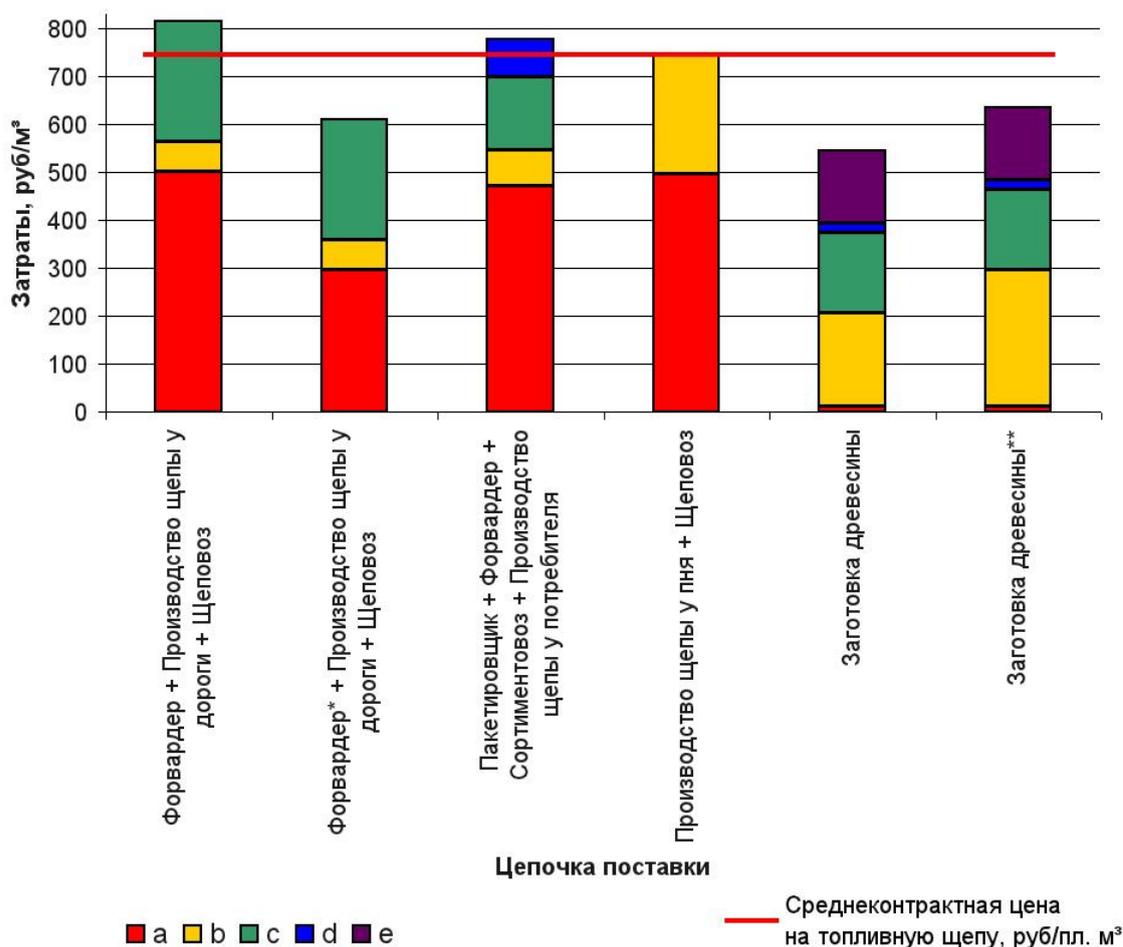


Рисунок 4. Структура затрат в себестоимости 1 плотного м³ щепы при расстоянии 50 км, руб. Первая делянка: (*) – "лучший сценарий", без учета постоянной составляющей затрат на работу форвардера; (**) – "худший сценарий", с учетом отвлечения форвардера на работы по сбору лесосечных отходов; (a)-(e) – пояснения в тексте.

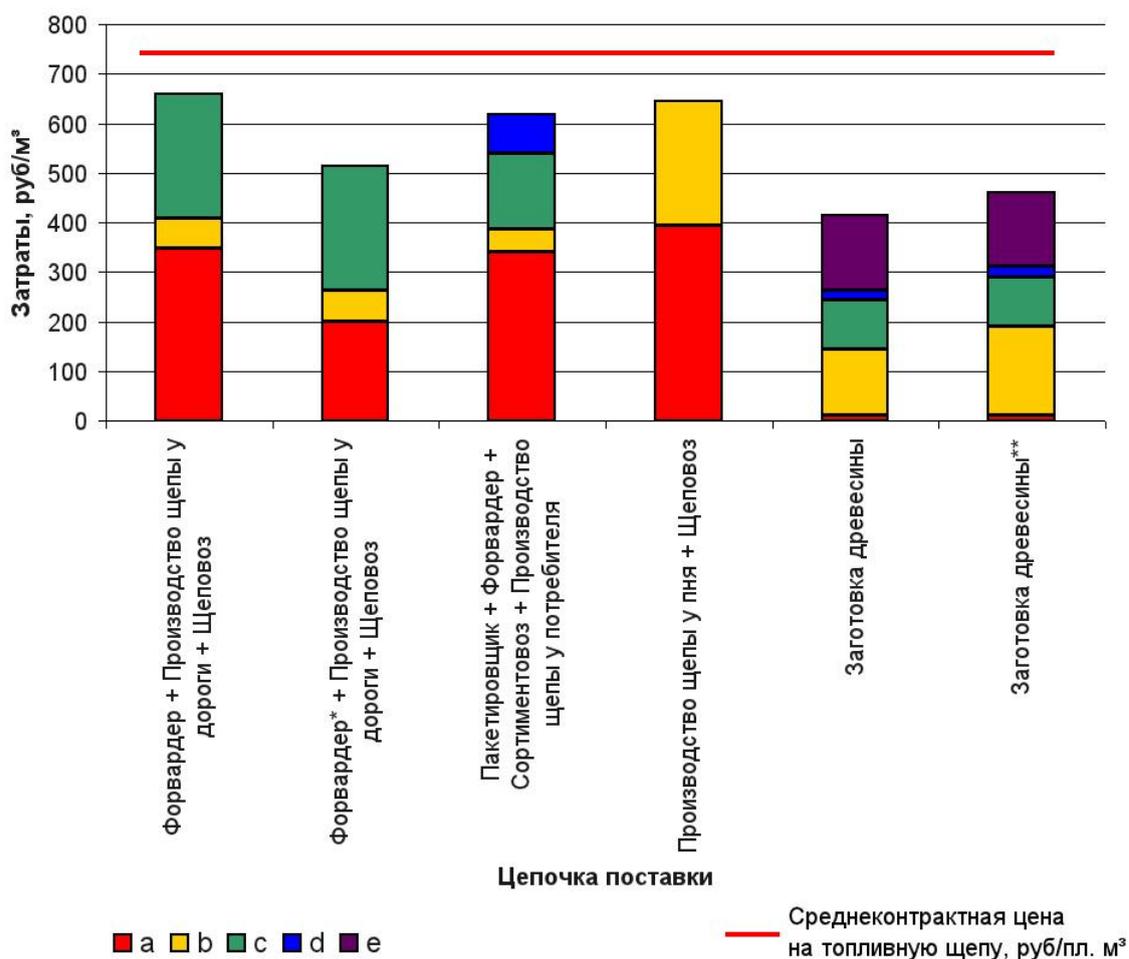


Рисунок 5. Структура затрат в себестоимости 1 плотного м³ щепы при расстоянии 50 км, руб. Вторая делянка; (*) – "лучший сценарий", без учета постоянной составляющей затрат на работу форвардера; (**) – "худший сценарий", с учетом отвлечения форвардера на работы по сбору лесосечных отходов; (а)-(е) – пояснения в тексте.

Пояснения к Рис. 4 и Рис. 5:

Первый вариант (форвардер, рубительная машина на погрузочной площадке, щеповоз):

а – затраты на работу форвардера при сборе лесосечных отходов;

б – затраты на рубку лесосечных отходов в щепу;

с – затраты на вывозку в щеповозе до потребителя.

Первый вариант* (без учета постоянной составляющей затрат на работу форвардера):

а – затраты на работу форвардера без постоянной составляющей;

б – затраты на рубку лесосечных отходов в щепу;

с – затраты на вывозку в щеповозе до потребителя.

Второй вариант (пакетирующая машина, форвардер, сортиментовоз, рубка у потребителя):

а – затраты на работу машины, пакетирующей лесосечные отходы;

б – затраты на трелевку пакетов форвардером;

с – затраты на вывозку пакетов потребителю;

d – затраты потребителя на рубку щепы из пакета лесосечных отходов.

Третий вариант (мобильная рубительная машина на делянке, щеповоз).

a – затраты на работу передвижной рубительной машины на базе форвардера;

b – затраты на вывозку в щеповозе до потребителя.

Заготовка древесины.

a – затраты на разметку волоков и подготовку площадки под погрузочную площадку;

b – затраты на работу харвестера;

с – затраты на работу форвардера;

d – затраты на очистку мест рубок;

e – затраты на вывозку сортиментов до потребителя.

Заготовка древесины** (затраты с учетом отрыва форвардера от работ по трелевке деловых сортиментов на трелевку лесосечных отходов).

a – затраты на разметку волоков и подготовку погрузочной площадки;

b – затраты на работу харвестера с учетом занятости форвардера;

с – затраты на работу форвардера;

d – затраты на уборку лесосеки;

e – затраты на вывозку сортиментов до потребителя.

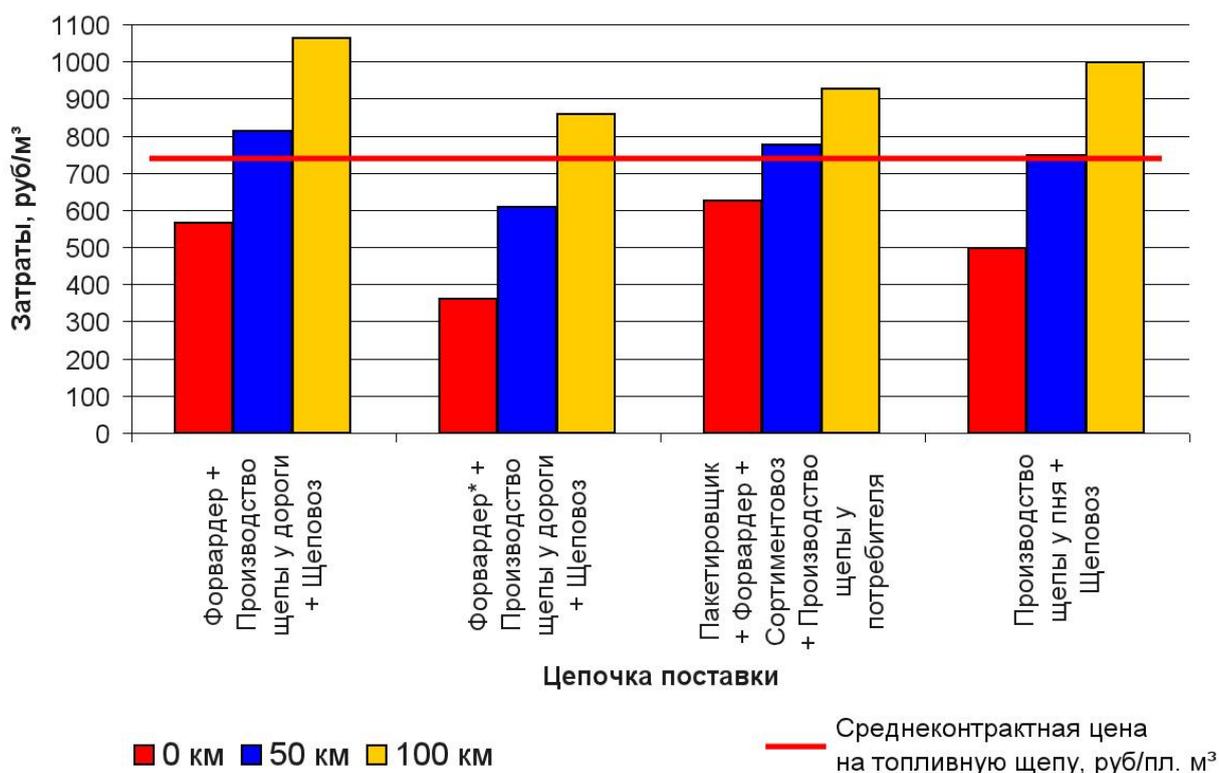


Рисунок 6. Зависимость себестоимости плотного м³ щепы от расстояния до потребителя, руб. Первая делянка: (*) – без постоянной составляющей затрат на работу форвардера.

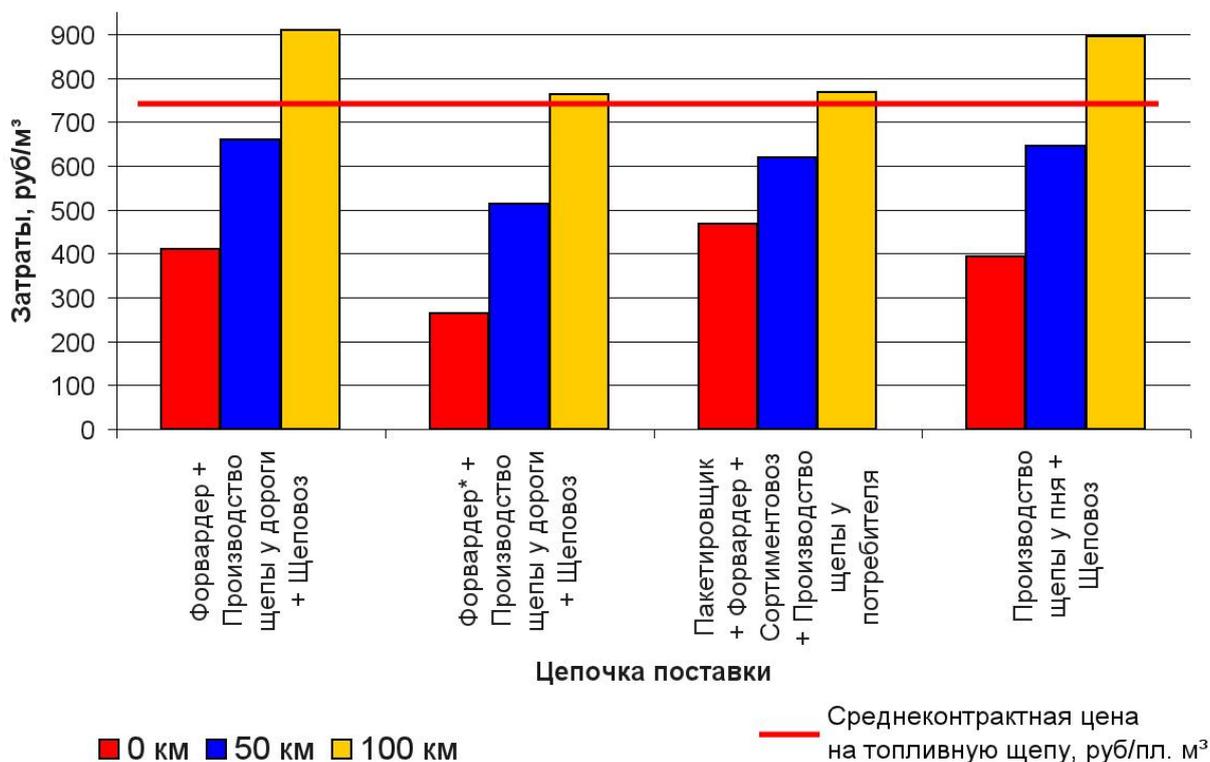


Рисунок 7. Зависимость себестоимости плотного м³ щепы от расстояния до потребителя, руб. Вторая делянка: (*) – без постоянной составляющей затрат на работу форвардера

Также в результате моделирования работы техники удалось рассчитать влияние выбранной технологии и системы машин на количество проходов техники по одному и тому же месту волока при сборе и трелевке лесосечных отходов. Рассчитывалось среднее количество проходов по всем точкам волока через 0,25 м.

Расчет количества проходов техники по магистральному волоку показал, что наименьшее количество проходов для сбора лесосечных отходов необходимо в случае с рубительной машиной на базе форвардера и с машиной, пакетирующей лесосечные отходы. Для варианта с форвардером на сборе лесосечных отходов требуется на 17% больше проходов, что связано с низкой плотностью лесосечных отходов.

Расчет количества проходов по пасечным волокам показал, что наименьшее количество проходов требуется при использовании вариантов с рубительной машиной на базе форвардера и при сборе лесосечных отходов с помощью форвардера. Для варианта с пакетирующей машиной требуется на 20% больше проходов техники, что связано с применением форвардера на сборе пакетов лесосечных отходов после прохода пакетирующей машины.

При использовании низкосортной древесины в качестве сырья для производства щепы необходимо решить вопрос о месте переработки этой древесины в щепу. Одна из возможностей заключается в переработке дров на погрузочной площадке и в транспортировке полученной щепы до потребителя в щеповозах. Второй вариант – это транспортировка

низкосортной древесины до потребителя на сортиментовозах, а сама рубка в щепу производится на стационарной рубительной машине потребителя. По результатам предварительных расчетов для двух рассматриваемых вариантов для второй модельной лесосечной деланки были получены диаграмма структуры затрат в себестоимости щепы из низкосортной древесины (Рис. 8) и зависимость себестоимости щепы, полученной только из низкосортной древесины, от расстояния до потребителя (Рис. 9).

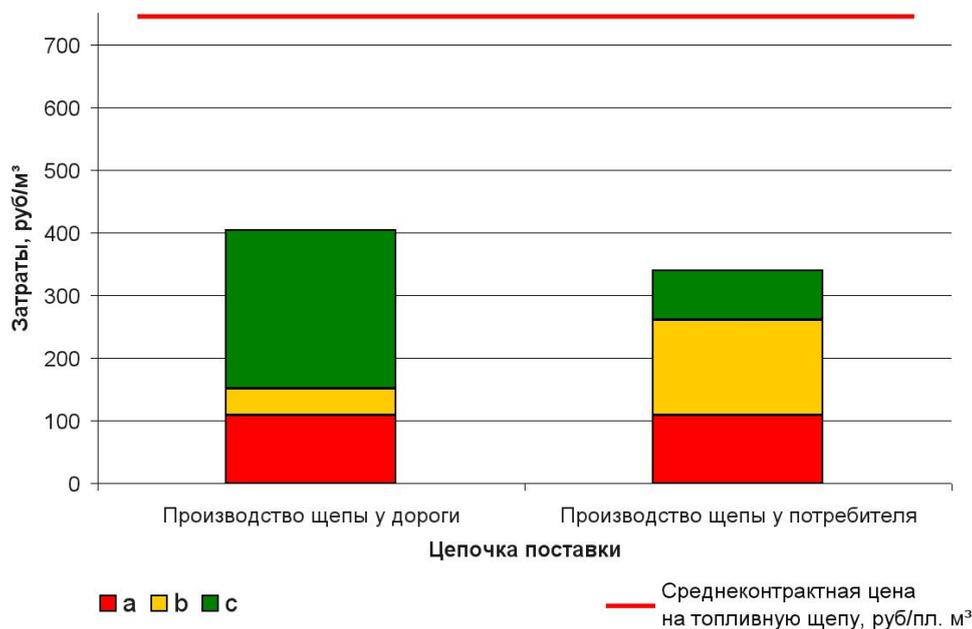


Рисунок 8. Структура затрат в себестоимости 1 плотного м³ щепы из низкосортной древесины при расстоянии 50 км, руб. Первый вариант (переработка низкосортной древесины в щепу на погрузочной площадке): (a) – затраты на работу форвардера при трелевке низкосортной древесины; (b) – затраты на рубку низкосортной древесины в щепу; (c) – затраты на вывозку в щеповозе до потребителя. Второго варианта (переработка низкосортной древесины в щепу у потребителя): (a) – затраты на работу форвардера при трелевке низкосортной древесины; (b) – затраты на вывозку низкосортной древесины до потребителя; (c) – затраты потребителя на рубку щепы из низкосортной древесины.

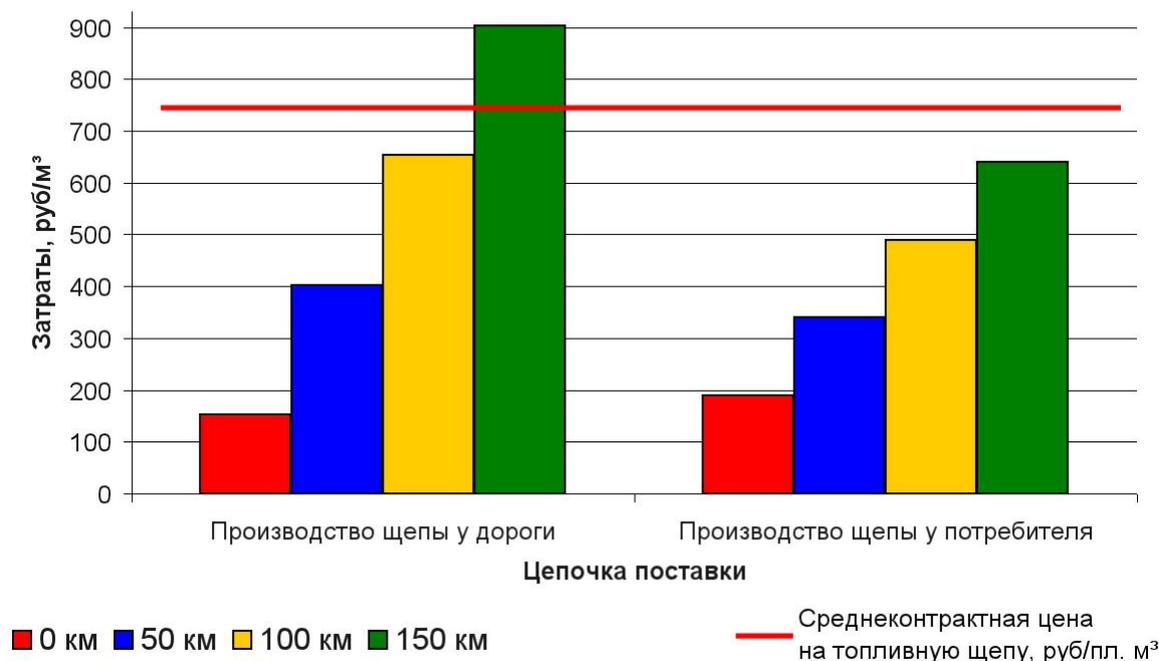


Рисунок 9. Зависимость затрат на плотный м³ щепы из низкосортной древесины от расстояния до потребителя, руб.

4. Обсуждение и заключение

Ряд работ по этому направлению был выполнен в последнее время в России [2,3], Белоруссии [23-25] и в совместных российско-финско-шведских проектах [26-35]. По результатам, полученным в данной работе, в сопоставлении с результатами других публикаций [2,4,13,14,17,29,30], можно сделать следующие выводы.

При текущих ценах сбор лесосечных отходов для переработки их в щепу рентабелен, если расстояние до потребителя не более 50 км. При расстоянии более 100 км расходы на транспортировку слишком велики вне зависимости от варианта. Использование низкосортной древесины для производства топливной щепы экономически выгоднее, чем использование лесосечных отходов, и в этом случае топливная щепка может транспортироваться на расстояние до 150 км.

При заготовке щепы из лесосечных отходов в небольших объемах наименьшие затраты на получение щепы будут при использовании форвардеров, но только, если последние не отвлекаются от работ по заготовке деловой древесины («лучший сценарий»). Это в некоторых случаях возможно в летние месяцы в связи с сезонностью лесозаготовок. При этом в цене щепы можно не учитывать постоянные затраты на содержание форвардера (см. Рис. 4 и Рис. 5, вариант «Форвардер* + Рубительная машина + Щеповоз»). В случае, если форвардер из комплекса будет отвлечен от трелевки сортиментов на трелевку лесосечных отходов, могут увеличиться затраты на заготовку деловой древесины («худший сценарий»). Вариант с использованием форвардера для сбора лесосечных отходов привлекателен еще тем, что не

требуется покупки дорогостоящих специализированных пакетирующих машин или мобильных рубительных машин.

Заготовка щепы из лесосечных отходов в больших объемах возможна только при постоянном и высоком спросе на щепу. Как показывают расчеты, при сборе и переработке значительных объемов лесосечных отходов для переработки в щепу, применение форвардеров на сборе отходов не является оптимальным решением (см. Рис. 6 и Рис. 7, вариант «Форвардер + Рубительная машина + Щеповоз»). При значительном расстоянии до потребителя щепы оптимальным решением будет вариант с использованием машины, пакетирующей лесосечные отходы в пакеты (см. Рис. 6 и Рис. 7, вариант «Пакетирующая машина + Форвардер + Сортиментовоз + Рубительная машина потребителя»). Использование лесовозной техники на вывозке пакетов дешевле, чем перевозка щепы щеповозами. Если цена щепы будет выше 800 руб. за плотный м³, рентабельной станет доставка щепы и на расстояние свыше 50 км.

Себестоимость заготовки щепы увеличивается при снижении запаса насаждения. Это необходимо учитывать при принятии решения о заготовке щепы на делянке.

Возможность использования лесосечных отходов для рубки в щепу зависит от несущей способности грунтов на лесосеках. При преобладании грунтов с недостаточной несущей способностью от идеи использовать лесосечные отходы в качестве сырья для щепы следует отказаться, и в этом случае отходы должны идти на укрепление волоков.

При решении вопроса о месте переработки низкокачественной древесины в топливную щепу наиболее выгодным является переработка такой древесины на рубительной машине потребителя, что связано с более дешевой доставкой низкокачественной древесины сортиментовозами по сравнению с транспортировкой щепы в щеповозах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках международного исследовательского проекта «Лесозаготовки и логистика в России – в фокусе научные исследования и бизнес – возможности» [2], в соответствии с Программой стратегического развития ПетрГУ на 2012-2016 год и при поддержке проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», финансируемого Европейским союзом по программе приграничного сотрудничества KareliaENPI и «Технико-экономическая и эколого-социальная оценка перспективности заготовки древесной биомассы для нужд местной энергетики с использованием логистического подхода и ГИС-технологий», выполняемого по заданию Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – № 35. – С. 1655-1662.
2. Лесозаготовки и логистика в России – в фокусе научные исследования и бизнес-возможности / В. Гольцев, Т. Толонен, В. С. Сюнёв, Б. Далин, Ю. Герасимов, С. Карвинен // *Труды НИИ леса Финляндии. – Йоэнсуу, 2012. – Вып. 221. – 159 с.*
3. Шегельман И.Р., Шукин П.О., Морозов М.Н. Место биоэнергетики в топливно-энергетическом балансе лесопромышленного региона // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2011. – № 6. – С. 151-154.
4. Efficiency of forest chip transportation from Russian Karelia to Finland / V. Goltsev, M. Trishkin, T. Tolonen // *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. – Joensuu, 2011. – Вып. 189. – 42 с.
5. Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П., Сюнёв В.С., Суханов Ю.В. Апробация системы поддержки принятия решений по использованию древесины в биоэнергетике: технико – экономическое обоснование // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2012. – № 8(1). – С. 90-94.
6. Герасимов Ю.Ю., Давыдков Г.А., Катаров В.К., Кильпелайнен С.А., Перский С.Н., Рожин Д.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Суханов Ю.В., Сунев В.С. Апробация системы поддержки принятия решений в лесной биоэнергетике: технико-технологическое обоснование // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 82(08). – С. 533-558.
7. Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Суханов Ю.В., Сюнёв В.С., Катаров В.К. Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2012. – № 8. – С. 25-27.
8. Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Сюнёв В.С. Системы машин для производства топливной щепы из древесной биомассы по технологии заготовки деревьями // *Тракторы и сельхозмашины, 2012, № 1 – С. 7-13.*
9. Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П., Сюнёв В.С. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 3(11) – С. 118-124.
10. Герасимов Ю.Ю., Сюнёв В.С., Соколов А.П., Селиверстов А.А., Катаров В.К., Суханов Ю.В., Рожин Д.В., Тюрлик И.И., Фирсов М.В. Рациональное использование древесины и лесосечных отходов в биоэнергетике: оценка потенциалов и технологических подходов // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2011. – № 73(9). – С. 187-198.
11. Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 4. – С. 101-107
12. Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сюнёв В.С. Основные факторы планирования производства древесного топлива из древесной биомассы // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2011. – № 8(2). – С. 77-80.
13. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнёв В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2012. – № 8(2). – С. 49-51.

14. Суханов Ю.В. Система моделирования лесозаготовок с учетом потребностей биоэнергетики // Вестник Московского государственного университета леса «Лесной Вестник». – 2013. – № 1. – С. 152-157.
15. Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Перский С.Н. Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – 2012. – № 9(2). – С. 58-61. – С 2013 г. загл. Resources and Technology.
16. Суханов Ю.В. Моделирование природно-производственных условий эксплуатации лесных машин // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – 2010. – № 8. – С. 149-150. – С 2013 г. загл. Resources and Technology.
17. Система поддержки принятия решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике. Второй этап: Методическое обоснование предлагаемых решений: отчет по НИР. / Ю.Ю. Герасимов, В.С. Сюнёв, А.П. Соколов, А.А. Селиверстов, В.К. Катаров, Д.В. Рожин, И. И. Тюрлик, М. В. Фирсов. – Петрозаводск, 2011. – 66 с.
18. Производство деловой древесины в Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sx/leszag.htm, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
19. Катаров В.К., Сюнёв В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты // Resources and Technology. – 2012. – № 9 (2). – С. 73-81.
20. Laitila J., Väätäinen K. Truck transportation and chipping productivity of whole trees and delimbed energy wood in Finland // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2012. – № 33(2). – С. 199-210.
21. Palviainen M., Finér L. Estimation of nutrient removals in stem-only and whole-tree harvesting of Scots pine, Norway spruce, and birch stand with generalized nutrient equations // European Journal of Forest Research. – 2012. – № 131. – С. 945-964.
22. Среднеконтрактные цены на основные виды продукции лесной и деревообрабатывающих отраслей, сложившиеся в Республике Карелия за январь-декабрь 2010 года // Официальный интернет-портал Республики Карелия «Карелия официальная» [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: http://gov.karelia.ru/gov/Power/Ministry/Development/Prices/price_wood_1012e.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
23. Ледницкий А.В. Сравнительный анализ систем машин для производства топливной щепы // Вестник Московского государственного университета леса «Лесной Вестник». – 2013. – № 1. – С. 94-99.
24. Ледницкий А.В. Методические подходы к оценке экономической эффективности производства древесного топлива / А.В. Ледницкий // Тр. БГТУ. Сер. VII. Экономика и управление. – Минск, 2010. – Вып. XVIII. – С. 122–126.
25. Федоренчик А.С. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов / Монография / А.С. Федоренчик, А.В. Ледницкий. - Минск: БГТУ, 2010. - 446 с.
26. Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнёв В.С., Герасимов Ю.Ю. // Resources and Technology. – 2012. – № 9 (2). – С. 94-105.
27. Герасимов Ю.Ю., Сенькин В.А., Вятайнен К. Производительность харвестеров на сплошных рубках // Resources and Technology. – 2012. – № 9 (2). – С. 82-93.
28. Goltsev V., Pavsky J., Gerasimov Y., Karjalainen T. Potential for biofuel development in Tihvin and Boksitogorsk districts of the Leningrad region // Forest Policy and Economics. – 2010. – № 12. – С. 308-316.

29. Goltsev V., Ilavský J., Karjalainen T., Gerasimov Y. Potential of energy wood resources and technologies for their supply in Tihvin and Boksitogorsk districts of the Leningrad region // *Biomass and Bioenergy*. – 2010. – № 34. – С. 1440-1448.
30. Laitila J. Methodology for choice of harvesting system for energy wood from early thinning // *Dissertationes Forestales*. – Joensuu, 2012. – Вып. 143. – 68 с.
31. Gerasimov Y., Senkin V., Väätäinen K. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the Northern European part of Russia // *European Journal of Forest Research*. – 2010. – № 131. – С. 647-654.
32. Gerasimov Y., Seliverstov A. Industrial roundwood losses associated with harvesting systems in Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2010. – № 30 (2). – С. 111-126.
33. Gerasimov Y., Sokolov A., Karjalainen T. GIS-based decision support program for planning and analysing short-wood transport in Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2008. – № 29(2). – С. 163-175.
34. Gerasimov Y., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2009. – № 31. – С. 35-45.
35. Gerasimov Y., Seliverstov A., Syunev V. Industrial round-wood damage and operational efficiency losses associated with the maintenance of a single-grip harvester head model: a case study in Russia // *Forests*. – 2012. – № 3 (4). – С. 864-880.

References

1. Gerasimov, Y., Karjalainen, T. 2011. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy* 35: 1655–1662.
2. Goltsev, V., Tolonen, T., Syunev, V., Dahlin, B., Gerasimov, Y., Karvinen, S. (eds.) 2012. Wood harvesting and logistics in Russia – focus on research and business opportunities. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 221, 159 pp.
3. Shegelman, I., Shchukin, P., Morozov, M. 2011. Place of bioenergetics in energy balance of forestry region, *Science and Business Development Ways* 6: 151–154.
4. Goltsev, V., Trishkin, M., Tolonen, T. 2011. Efficiency of forest chip transportation from Russian Karelia to Finland. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 189, 42 pp.
5. Gerasimov, Y.Y., Sokolov, A.P., Syunev, V.S., Sukhanov, Y.V. 2012. Approbation of the decision support system for forest energy: Economic background. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science* 8(129): 90–94.
6. Gerasimov, Y.Y., Davydkov, G.A, Katarov, V.K., Kilpelianen, S.A., Persky, S.N., Rozhin, D.V., Seliverstov, A.A., Sokolov, A.P., Sukhanov, Y.V., Syunev, V.S. 2012. Approbation of the decision support system for forest energy: Technological background. *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University* 82(8): 564–588.
7. Seliverstov, A.A., Gerasimov, Y.Y., Sukhanov, Y.V., Syunev, V.S., Katarov, V.K. 2012. Evaluation of effectiveness of the wood chips production in timber terminal. *Tractors and Agricultural Machinery* 8: 25–27.
8. Sukhanov, Y.V., Seliverstov, A.A., Syunev, V.S., Gerasimov, Y.Y. 2012. Machine systems for production of fuel chips from woody biomass using full-tree harvesting method. *Tractors and Agricultural Machinery* 1: 7–13.
9. Gerasimov, Y., Sokolov, A., Syunev, V. 2011. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting. *Systems Methods Technologies* 3(11): 118–124.
10. Gerasimov, Y.Y., Syunev, V.S., Sokolov, A.P., Seliverstov A.A., Katarov V.K., Sukhanov Y.V., Rozhin, D.V., Tyurlik, I.I., Firsov, V.M. 2011. Rational energy use of wood-based biomass: Estimation of potentials. *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University* 73(9): 576 – 587.

11. Sukhanov, Y.V., Gerasimov, Y.Y., Seliverstov, A.A., Sokolov, A.P. 2011. Technological chains and machine systems for collecting and processing woody biomass into fuel chips in clear-cutting harvesting by cut-to-length. *Systems Methods Technologies* 4(12): 101–107.
12. Gerasimov, Y.Y., Seliverstov, A.A., Sukhanov, Y.V., Syunev, V.S. 2011. Major factors affecting process production planning of wood fuels from woody biomass. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science* 8(121): 77–80.
13. Sukhanov, Y.V., Seliverstov, A.A., Sokolov, A.P., Syunev, V.S. 2012. Simulation model of harvester: algorithms and realization. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science* 8(2): 49–51.
14. Sukhanov, Y.V. 2013. Computer simulation of wood harvesting with consideration of bioenergy. *Forest Vestnik* 1: 152–157.
15. Sukhanov, Y., Seliverstov, A., Sokolov, A., Persky, S. 2012. Simulation of forwarding operations: algorithms and implementation. *Resources and Technology* 9 (2): 58–61.
16. Sukhanov, Y. 2010. Modeling of natural production conditions for forestry machinery. *Resources and Technology* 8: 149–150.
17. Gerasimov, Y.Y., Sokolov, A.P., Syunev, V.S., Katarov, V.K., Seliverstov, A.A, Sukhanov, Y.V. 2011. Decision support system for the boosting of the rational use of woody biomass. Second stage: methodological basis of the proposed solutions: a report on research, Petrozavodsk, 66 p.
18. Federal State Statistics Service 2012. Online database of the Federal State Statistics Service. www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sx/leszag.htm. [Cited 20 October 2012].
19. Katarov, V., Syunev, V., Ratkova, E., Gerasimov, Y. 2012. Impact of wood forwarding on forest soils. *Resources and Technology* 9(2): 73-81.
20. Laitila, J., Väätäinen, K. 2012. Truck transportation and chipping productivity of whole trees and delimbed energy wood in Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2): 199-210.
21. Palviainen, M., Finér, L. 2012. Estimation of nutrient removals in stem-only and whole-tree harvesting of Scots pine, Norway spruce, and birch stand with generalized nutrient equations. *European Journal of Forest Research* 131: 945–964.
22. Ministry of the Economic Development of the Republic of Karelia 2012. Average contract prices for major types of products in forest and woodworking industries in the Republic of Karelia in 2010. www.gov.karelia.ru/gov/Power/Ministry/Development/Prices/price_wood_1012e.html. [Cited 20 October 2012].
23. Lednizkij, A.V. 2013. Comparative analysis systems of machines for wood chips productions. *Forest Vestnik* 1: 94–99.
24. Lednizkij, A.V. 2010. Methodological approaches to the assessment of economic efficiency of wood fuel. Research reports of BSTU. Series VII. Economics and Management XVIII: 122–126.
25. Fedorenchik, A.S., Lednitskij, A.V. 2010. Energy use of low-quality wood and wood waste. BSTU, Minsk, 446 pp.
26. Seliverstov, A., Sokolov, A., Syunev, V., Gerasimov, Y. 2012. Impact of wood harvesting systems on round wood quality. *Resources and Technology* 9: 94–105.
27. Gerasimov, Y., Senkin, V., Väätäinen, K. 2012. Productivity of harvesters in clear cuttings. *Resources and Technology* 9(2): 82–93.
28. Goltsev, V., Ilavsky, J., Gerasimov, Y., Karjalainen, T. 2010. Potential for biofuel development in Tihvin and Boksitogorsk districts of the Leningrad region. *Forest Policy and Economics* 12(4): 308–316.
29. Goltsev, V., Ilavský, J., Karjalainen, T., Gerasimov, Y. 2010. Potential of energy wood resources and technologies for their supply in Tihvin and Boksitogorsk districts of the Leningrad region. *Biomass and Bioenergy* 34: 1440–1448.
30. Laitila, J. 2012. Methodology for choice of harvesting system for energy wood from early thinning, *Dissertationes Forestales* 143, 68 pp.

31. Gerasimov, Y., Senkin, V., Väättäinen K., 2010. Productivity of single-grip harvesters in clear-cutting operations in the Northern European part of Russia. *European Journal of Forest Resources* 131: 647–654.
32. Gerasimov, Y., Seliverstov, A. 2010. Industrial round-wood losses associated with the harvesting systems in Russia. *Croatian Journal of Forest Engineering* 31(2): 111–126.
33. Gerasimov, Y., Sokolov, A., Karjalainen, T. 2008. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia. *Croatian Journal of Forest Engineering* 29(2): 163–175.
34. Gerasimov, Y., Katarov, V., 2010. Effect of bogie track and slash reinforcement on sinkage and soil compaction in soft terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering* 31(1): 35–45.
35. Gerasimov, Y., Seliverstov, A., Syuney, V. 2012. Industrial round-wood damage and operational efficiency losses associated with the maintenance of a single-grip harvester head model: a case study in Russia. *Forests* 3(4): 864–880.