

Научная статья

УДК 004.03 + 630*3

DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-5-17

Использование систем поддержки принятия решений в лесной промышленности: экологический аспект

Михаил Юрьевич Васенёв

Поволжский государственный технологический университет

Йошкар-Ола, Россия

AspIVS16.20@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3405-8342>

Аннотация

Рассматриваются вопросы применения информационных технологий в лесной промышленности. Отмечается, что данной отрасли требуется техническая и технологическая модернизация в рамках концепции «Индустрия 4.0». Описываются методы, которые дают возможность снизить негативное влияние лесозаготовительных машин на окружающую среду. Акцент делается на том, что максимальный урон почвогрунтам наносят колесные движители лесной техники. Предлагается использовать системы поддержки принятия решений (СППР) для улучшения и упрощения процесса контроля над происшествиями на территории, предназначеннной для рубки леса. Даётся структура такой системы, описываются основные составные части, принципы их функционирования. Предлагаются некоторые технические показатели для оценки изменений вследствие внедрения описываемой СППР, среди них: время реакции на происшествие с момента его выявления, время анализа ситуации и время ликвидации загрязнения, а также глубина колеи, образуемая лесной машиной. Проводится моделирование ряда ситуаций, подчеркивающих эффективность применения СППР, таких как: 1) можно ли сократить время очищения почвы от нефтепродуктов; 2) можно ли предотвратить превышение необходимого уровня глубины колеи. Рассматривается влияние СППР на существующие показатели «Индустрии 4.0». Обоснованы выводы о целесообразности и эффективности использования СППР в лесной промышленности. Отмечается, что применение СППР в определенной степени позволит предотвратить эрозию лесных почв на лесосеке, а также предупредить снижение плодородия, вызванного нерациональным использованием и химическим загрязнением.

Ключевые слова

технологическая модернизация, лесные машины, СППР, очищение почвы, глубина колеи

Для цитирования

Васенёв М. Ю. Использование систем поддержки принятия решений в лесной промышленности: экологический аспект // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 1. С. 5–17. DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-5-17

Decision Support Systems Utilization in Forestry: Environmental Aspect

Mikhail Yu. Vasenev

Volga State University of Technology

Yoshkar-Ola, Russian Federation

AspIVS16.20@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3405-8342>

Abstract

In this paper, the actuality of utilization of informational technology in forestry is underlined. There is noted, that the technical and technological modernization within the frameworks of “Industry 4.0” for this sector is required. There

© Васенёв М. Ю., 2022

are described methods, which give the potential to reduce forest machines' negative influence on the environment. There is emphasized, that the maximal damage to soils is inflicted by wheel propellers. There is proposed to use decision support systems (DSS) for the control process improvement and simplification on the territory, intended for cutting. There is given the system structure, main elements, and theirs principles of functioning are described. There are proposed some performance characteristics for the measurement of changes in consequence of the implementation of the depicted DSS, among them: response time on an incident from the moment of detection, situation analysis time, clearing time, and track depth, created by forest machine. There is made the simulation of an array of situations, stressing an efficiency of DSS use, such as: a) Can one reduce a soil purification time from oil products? b) Can one prevent an exceeding of the required track depth level? There is considered an impact of this DSS on existing indices of "Industry 4.0". There are substantiated conclusions about the reasonability and efficiency of this DSS usage in forestry. There is noticed, that the DSS application to some extent allows preventing the erosion of forest soils, also to warn a diminishing of fertility, created by the irrational use and chemical pollution.

Keywords

technological modernization, forest machines, DSS, soil purification, track depth

For citation

Vasenev M. Yu. Decision Support Systems Utilization in Forestry: Environmental Aspect. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2022, vol. 20, no. 1, p. 5–17. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2022-20-1-5-17

Введение

Бурный рост промышленности в XX в. оказал сильное негативное влияние на состояние природы. Данный момент актуализировал стремление мирового сообщества к более бережному отношению к окружающей среде. Так, в обзоре глобальных рисков 2021 г. от Всемирного экономического форума (WEF) на 1-м месте – инфекционные заболевания, а на 2-м – провал борьбы с изменением климата и другие экологические риски¹. Что может помочь человеку удовлетворить возросшие требования к экологичности, взять под контроль климатические изменения? Ответ напрашивается сам собой – высокие технологии. Именно на них и делает упор концепция «Индустрия 4.0». Напомним, что подразумевает под собой данное понятие. Грубо говоря, это синоним *цифровой трансформации, интеграции* информационно-коммуникационных технологий в функционирование определенной отрасли экономики государства (промышленность, здравоохранение и пр.). Подробнее о технологиях «Индустрии 4.0» см. на сайте SAP².

Лесная промышленность, как ни одна другая, порождает множество экологических проблем, среди них: загрязнение почв нефтепродуктами, повреждение почв движителями лесной техники, захламление мест заготовок вторсырьем и т. д. Существуют различные подходы к решению таких проблем, но в рамках этой статьи мы остановимся на применении систем поддержки принятия решений (СППР) как способе борьбы с данными происшествиями.

Итак, целью данной работы является разработка теоретических положений для СППР, позволяющих снизить негативное влияние лесозаготовительных машин на окружающую среду.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- 1) дать краткую характеристику методам, на основе которых строится СППР;
- 2) привести принципы построения, описать архитектуру предлагаемой СППР для оценки негативного влияния лесных машин на окружающую среду;
- 3) предложить технические показатели для оценки изменений вследствие внедрения СППР, произвести компьютерное моделирование определенных ситуаций;
- 4) рассмотреть влияние описываемой СППР на показатели «Индустрии 4.0».

¹ <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2021/08/27/883464-pochemu-ekologiya>

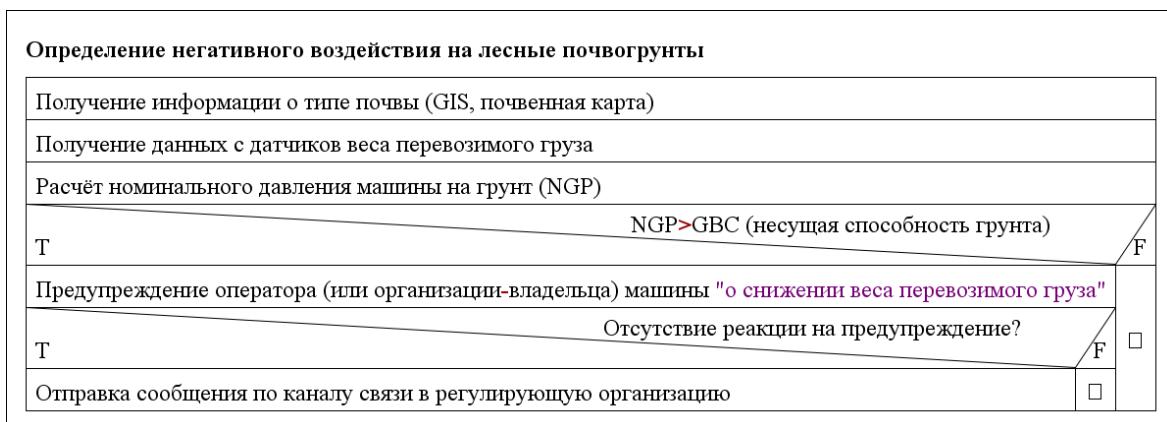
² <https://www.sap.com/cis/insights/what-is-industry-4-0.html>

Описание методов

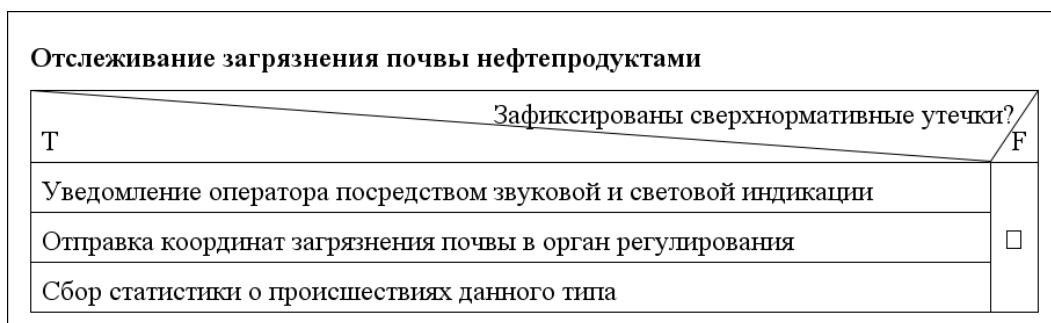
Напомним, что в работе [1] были предложены методы, позволяющие *снизить негативное влияние лесозаготовительных машин (ЛЗМ) на окружающую среду*. Далее кратко рассмотрим их.

Первый метод (рис. 1) отличается от существующих тем, что позволяет избавиться от необходимости постоянного использования грузовых весов для оценки веса перевозимых сортиментов, что, в свою очередь, необходимо для получения значений номинального давления машины на грунт (в случае с форвардером). Более того, он не требует применения дополнительного дорогостоящего оборудования, как LiDAR, беспилотных летательных аппаратов с фотографическим оборудованием, см. [2; 3]. Помимо основной задачи, данный метод позволит в некоторой степени сократить длительность рабочего цикла машины, что приведет к дополнительным экономическим выгодам.

Второй метод (рис. 2) отличается от существующих тем, что для определения количества утекших нефтепродуктов не требуется дополнительного оборудования и / или персонала, осуществляющего наблюдение за данными происшествиями. Контроль осуществляется только на основании информации, полученной от датчиков, установленных в каждой лесозаготовительной машине (например, датчик уровня гидравлической жидкости, дизельного топлива и т. п.).



Ruc. 1. Диаграмма Насси – Шнейдермана для первого метода
Fig. 1. Nassi – Shneiderman diagram for the first method



Ruc. 2. Диаграмма Насси – Шнейдермана для второго метода
Fig. 2. Nassi – Shneiderman diagram for the second method

Описание структуры СППР

Предполагая, что читатели данного журнала уже в определенной степени знакомы с тем, что представляет собой СППР, рассмотрим лишь конспективно основные положения, касающиеся этого понятия.

Согласно определению, данному В. А. Геловани и др. в [4], СППР – это компьютерная система, которая должна предоставлять лицу, принимающему решение, средства для использования моделей и данных, чтобы распознавать, понимать и формулировать задачи.

В зависимости от способа воздействия на процесс принятия решения различают следующие СППР: *пассивные* (предоставляют лишь информацию для принятия решений), *активные* (предлагают альтернативные готовые варианты) и *комбинированные* (ЛПР может вносить изменения в предложенное системой решение и согласовывать их до обретения им оптимальной формы)³.

Внедрение СППР позволяет:

- упростить и ускорить процесс принятия решений;
- наладить систему контроля в организации;
- предвидеть и предотвратить вероятные убытки;
- более эффективно оперировать данными;
- проводить прогнозирование и выявлять скрытые риски, и т. п.

В состав типовой СППР входят следующие компоненты:

- модуль хранения и обработки данных;
- модуль хранения и использования моделей;
- интерфейсный модуль.

Далее перейдем к описанию структуры СППР (рис. 3), в основе которой лежат вышеописанные методы.

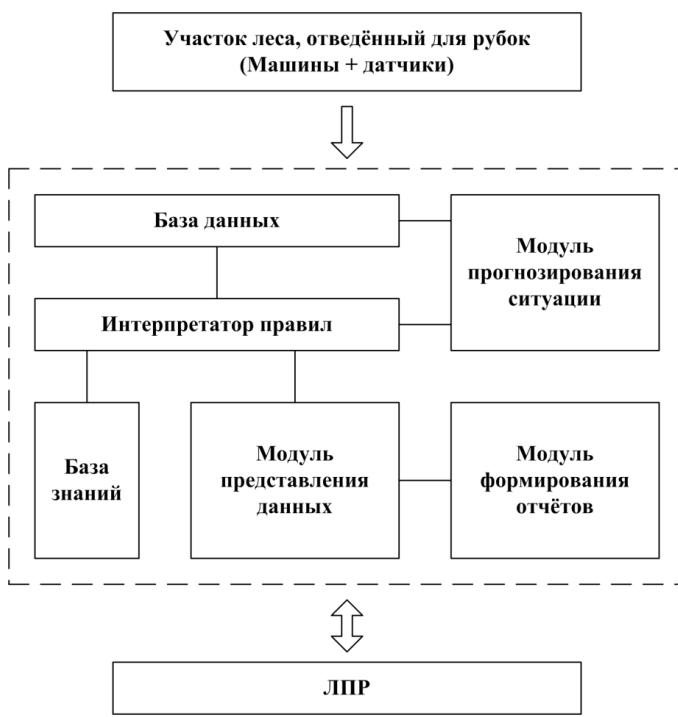


Рис. 3. Структура СППР оценки негативного влияния лесных машин на окружающую среду
Fig. 3. Structure of the DSS for forest machines' negative effect estimation on the natural environment

³ https://fisgroup.ru/blog/fis_dss_opisanye_systemy/

Информация поступает с места рубок от лесной машины, оснащенной необходимыми датчиками (веса, уровня гидравлической жидкости и т. д.), и заносится в базу данных (БД).

Следующий блок – база знаний (БЗ). Она содержит определенные экспертные знания, с помощью которых производится анализ некоторой ситуации. Для БЗ удобно использовать нечеткий логический вывод [5; 6].

Что под ним подразумевается? *Нечеткий логический вывод* – это аппроксимация зависимости $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами. Процесс нечеткого логического вывода – это процедура или алгоритм получения нечеткого вывода на основе нечетких условий или предпосылок⁴.

В общем виде нечеткую продукционную модель можно представить как [7]

$$M = \langle L, R, Pf, FI, Pd \rangle,$$

где L – множество лингвистических переменных (входных и выходных); R – база нечетких продукционных правил; Pf – процедура фазификации; FI – блок нечеткого логического вывода; Pd – процедура дефазификации.

Рассмотрим элементы модели.

Лингвистическая переменная – переменная, значениями которой являются не числа, а слова или фразы из некоторого языка. Например, лингвистическая переменная A = “скорость движения” и ее терм-множество K = <“высокая”, “средняя”, “низкая”>.

Продукционное правило – это правило вида ЕСЛИ <условие> ТО <действие>.

Например:

- Если $GBC = 15$ и $NGP = 10$, то нарушение = нет.

Добавим ещё переменные:

- Если $GBC = 3$ и влажность грунта = очень высокая, и $NGP = 3$, то нарушение = да.
- Если $GBC = 7$ и влажность грунта = низкая, и дорожное покрытие = укрепленное, и $NGP = 9$, то нарушение = нет.
- Если $GBC = 10$, влажность грунта = высокая, и дорожное покрытие = отсутствующее, и скорость движения машины = высокая, и $NGP = 9$, то нарушение = да.

Процедура фазификации – на данном этапе устанавливается соответствие между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной⁵.

Блок нечеткого логического вывода использует базу нечетких продукционных правил и включает три процедуры:

- $P1$ – процедура агрегирования степени истинности предпосылок нечетких правил;
- $P2$ – процедура активизации заключений нечетких правил;
- $P3$ – процедура аккумулирования активизированных заключений нечетких правил.

Процедура дефазификации – это процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее числовому значению.

В целом разработка БЗ – довольно обширная задача, которая требует рассмотрения в рамках отдельной статьи.

Возвращаемся к структуре СППР. Далее правила из БЗ и данные из БД поступают на вход *интерпретатора правил* (ИП). Данный программный модуль имитирует логический вывод эксперта, используя имеющуюся информацию. Если ее недостаточно, то она может быть получена в результате диалога с ЛПР.

ИП непосредственно связан с *модулем прогнозирования ситуации*, который позволяет предсказывать вероятные инциденты. Прогнозирование может осуществляться автоматически либо по команде от пользователя на основе данных о текущем состоянии ЛЗМ. Далее информация поступает в *модуль представления данных*, где она отображается в виде, наибо-

⁴ https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=34798

⁵ <http://nrsu.bstu.ru/chap27.html>

лее удобном для восприятия ЛПР, причем пользователь не должен заниматься поиском информации для анализа ситуации, она должна поступать к нему непрерывно и в автоматическом режиме.

Оператор должен иметь возможность сформировать, экспорттировать отчет в удобном для прочтения формате как после наступления определенного события, так и за определенный временной период (час, день, неделя и т. д.).

ЛПР будет иметь возможность непосредственного контроля, но в то же время система должна поддерживать интерактивный режим функционирования. Это, в свою очередь, сократит нагрузку на пользователя и приведет к улучшению качества выполняемых работ.

Каким *принципам* должна отвечать предлагаемая СППР? Что нужно учитывать при ее проектировании и разработке? Необходимо отметить следующие позиции:

- возможность прогнозировать поведение различных показателей;
- способность автоматически отслеживать текущие и формирующиеся инциденты;
- возможность анализировать взаимосвязь событий и процессов;
- прогнозирование поведения одних показателей в зависимости от значений других;
- простота и удобство использования, а также информативность системы [8].

Оценка изменений вследствие внедрения предлагаемой СППР

Видится возможным производить оценку по следующим техническим показателям.

1. *Время реакции на происшествие с момента его выявления* (T_B). В случае отсутствия такой системы высока вероятность того, что инцидент будет скрыт или обнаружен через большой промежуток времени, когда рекультивация земель станет более трудоемкой или невыгодной с экономической точки зрения. При наличии такой системы мы наблюдаем иную ситуацию: время реакции зависит лишь от самого персонала, осуществляющего мониторинг лесных насаждений / контролирующего процесс лесозаготовок на определенной территории.

2. *Время анализа ситуации* (T_a) и *ликвидации загрязнения* (T_d). Данные параметры прямо зависят от сложности инцидента, а также отсутствия или наличия аналогичного случая в БЗ СППР. Кроме того, они зависят от удаленности места лесозаготовок, погодных условий, состояния лесных дорог, вида почв и т. п.

3. *Глубина колеи, образуемая лесной машиной*. Нетрудно догадаться, что серьезный механический урон почвенному покрову наносят именно движители лесных машин. Согласно О. Н Бурмистровой и др. [9], допустимая глубина колеи после первого прохода ЛЗМ не должна превышать 20 см. Данный факт подтверждается и другими исследователями в [10].

Имитационное моделирование

Рассмотрим в качестве иллюстрации следующие ситуации.

Каким образом можно сократить время очищения почвы от нефтепродуктов?

Для этого обратимся к модели, описанной Е. А. Ельчаниновой⁶. Согласно ей, суммарное время, необходимое для полного очищения почвенного покрова после инцидента, определяется как:

$$t_{\text{полн}} = t_{VR} + t_{no} + t_{nq},$$

где t_{VR} – время впитывания нефтепродуктов из подстилки в почву; t_{no} – время, необходимое для очищения подстилки от нефтепродуктов за счет деградации и вымывания осадками в растворенном виде; t_{nq} – время полного очищения почвы от нефтепродуктов за счет деградации и вымывания осадками в растворенном виде.

⁶ <https://portal.tpu.ru/SHARED/e/ELCHANINOVA/study/Tab3>

Данные переменные можно вычислить по следующим формулам:

$$t_{VR} = \frac{(V_{A0} - V_{A\Gamma})}{q_0},$$

где V_{A0} – начальный объем нефтепродуктов в подстилке после аварии, м^3 ; $V_{A\Gamma}$ – остаточная нефтеемкость подстилки, м^3 ; q_0 – интенсивность впитывания нефтепродуктов, $\text{м}/\text{сут}$;

$$t_{nd} = -\frac{1}{\lambda} * \ln\left(\frac{J}{\lambda * V_{A\Gamma} + J}\right),$$

$$t_{nq} = -\frac{1}{\lambda} * \ln\left(\frac{J}{\lambda * V(t_{nd}) + J}\right),$$

где λ – коэффициент деградации нефтепродуктов в подстилке и почве, сут^{-1} ; J – интенсивность растворения нефтепродуктов проникающими в подстилку дождевыми осадками, $\text{м}/\text{сут}$; $V(t_{nd})$ – объем нефтепродуктов в почве на момент t_0 , м^3 .

Рассмотрим следующий пример.

Плотность дизельного топлива 900 $\text{кг}/\text{м}^3$; отношение вязкостей дизельного топлива и воды 4; толщина подстилки 0,05 м (рис. 4, a); пористость подстилки 0,3; влажность подстилки 0,07; пористость почвы 0,5; влажность почвы 0,15; коэффициент фильтрации почвы 1 $\text{м}/\text{сут}$; температура воздуха и топлива в момент происшествия 20°C; годовая норма осадков 450 мм (рис. 4, b); коэффициент деградации нефтепродуктов 0,01 сут^{-1} .

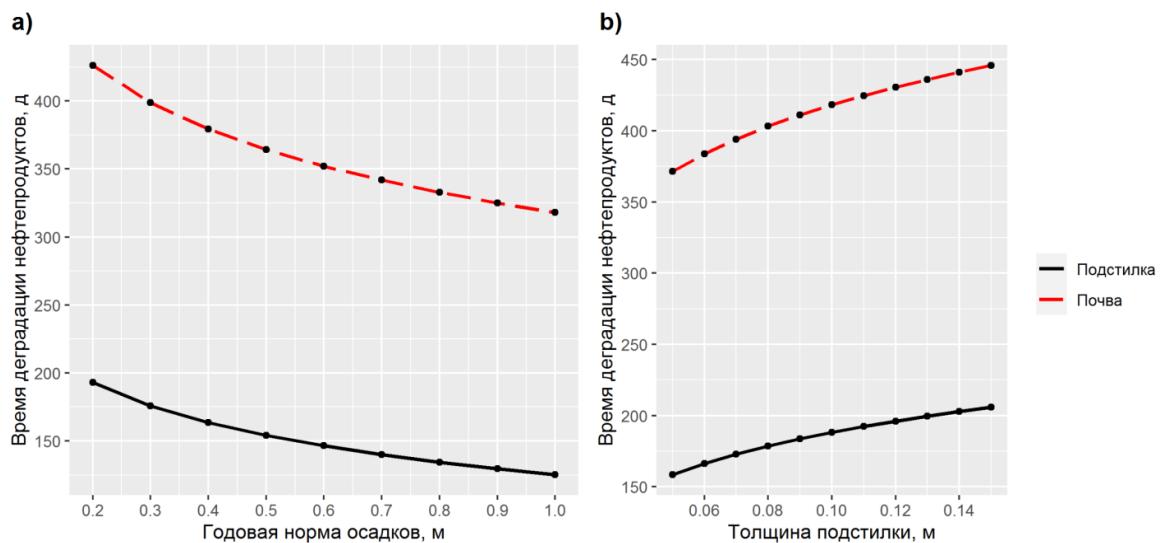


Рис. 4. Графики зависимости времени деградации загрязнения:
a – от годовой нормы осадков; b – от толщины лесной подстилки

Fig. 4. Dependence charts of the pollution degradation time:
a – from the mean annual rainfall; b – from the thickness of forest floor

Как видно из графика, для полного разложения нефтепродукта необходимо довольно значительное время (более 200 дней для подстилки толщиной в 0,15 м).

В случае применения СППР, своевременного реагирования и проведения незамедлительных мер по рекультивации загрязненной территории это время можно сократить в несколько

раз. Например, использование биопрепараторов позволяет снизить содержание нефтепродуктов в почве в ходе рекультивационных мероприятий до значения норматива *ДОСНП* за ~ 50 суток [11] или полностью устраниить загрязнение за приблизительно схожий срок⁷.

Как предотвратить превышение необходимого уровня глубины колеи?

По формуле G. W. Turnage [12] глубина колеи после первого прохода машины с одинаковыми шинами определяется как

$$z = 4.61 * n^{0.5} * (CI / NGP)^{-2.6} * D,$$

где n – число проездов ЛЗМ; CI – конусный индекс (показатель прочностных характеристик почвогрунта), кПа; NGP – номинальное давление машины на грунт, кПа; D – диаметр колеса, м.

Чтобы определить величину колеи после нескольких проходов, воспользуемся формулой, представленной в работе A. Abebe, T. Tanaka, T. и M. Yamazaki [13]:

$$z_n = z_1 + n^{\frac{1}{a}},$$

где z_1 – глубина колеи после первого прохода, м; n – число проходов; a – коэффициент, зависящий от числа проходов и типа грунта (в случае с одинаковыми шинами принимается за 2).

Проиллюстрируем (рис. 5 и 6), используя следующие данные:

график 1 – $NGP = 60$ кПа, CI изменяем от 200 до 800 кПа,

график 2 – $CI = 400$ кПа, значение NGP изменяем в диапазоне от 30 до 120 кПа, $D = 1,5$ м.

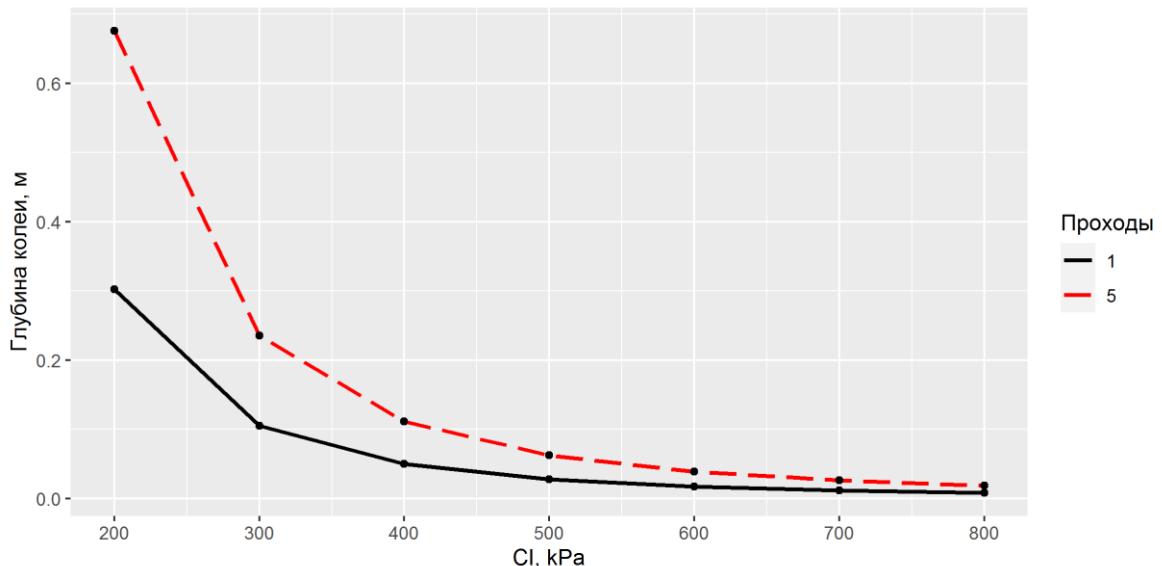


Рис. 5. График зависимости глубины колеи от значения конусного индекса
Fig. 5. Dependence chart of the track depth value from CI

⁷ http://pkf-gran.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=122

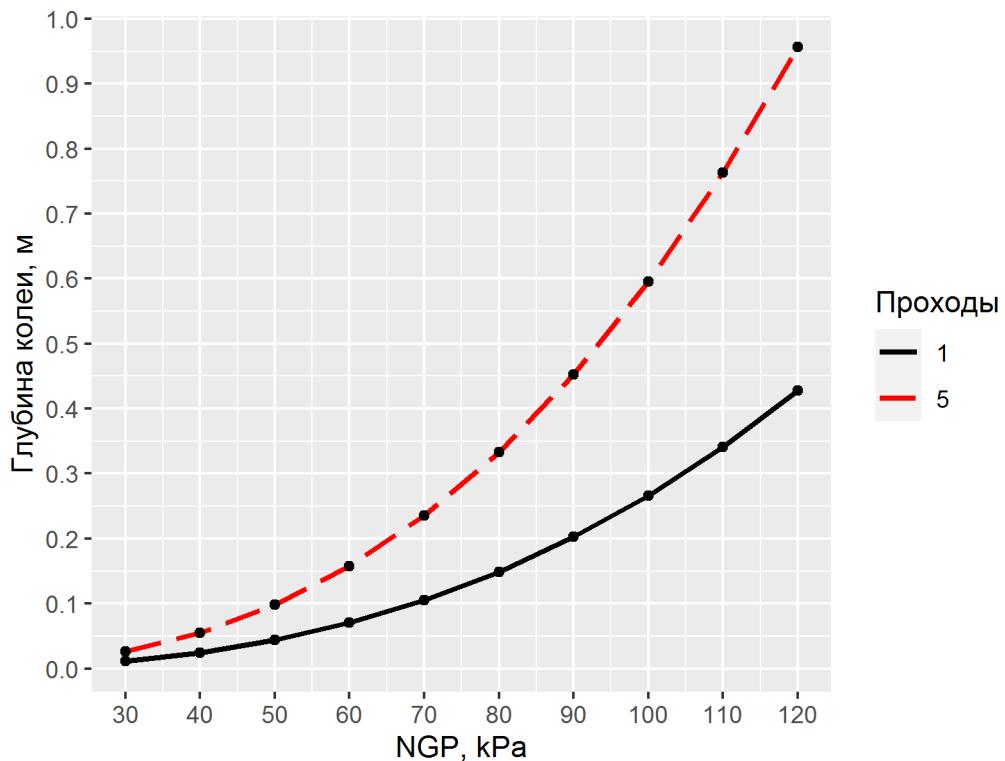


Рис. 6. График зависимости глубины колеи от значения NGP
Fig. 6. Dependence chart of the track depth value from NGP

Можно заметить, что в ряде случаев (например, график 1 – СІ в диапазоне от 200 до 250 kPa, график 2 – NGP более 90 kPa) происходит превышение требуемой колейности при первом проходе машины. Определение значений NGP в реальном времени позволит избежать таких ситуаций.

Влияние СППР на показатели «Индустрин 4.0»

Напомним, ранее в статье было отмечено, что лесной отрасли требуется техническая и технологическая модернизация в рамках концепции «Индустрин 4.0». Далее рассмотрим, какое влияние оказывает предлагаемая СППР на ее показатели.

G. Schuh, R. Anderl и др. выделяют группу показателей «Индустрин 4.0». В рамках данной работы нас интересует только один из них, а именно «Общая эффективность систем». Он включает в себя следующие три подпоказателя [14]:

- коэффициент эффективности ($K1$);
- коэффициент качества ($K2$);
- коэффициент доступности ($K3$).

K1. Как определить текущее значение? В отчете о результатах совместного экспертино-аналитического мероприятия «Анализ эффективности использования лесных ресурсов Российской Федерации в 2016–2018 годах» отмечается, что необходимый объем осмотра лесосек не осуществляется ввиду нехватки штатного персонала (например, в 2018 г. в Иркутской области осуществлен осмотр 56 % лесосек) [15].

В связи с этим, а также исходя из утверждения, что данная СППР отсутствует в существующих лесхозах, примем данную величину за $\sim 60\%$.

Каким будет значение после внедрения СППР? В идеальном случае эта величина должна составлять 100 %, что не всегда достижимо на практике. На текущий момент, реальным видится средний показатель в ~ 75-80 %. Из чего строится такой вывод? Какие факторы влияют на это значение? Основных можно выделить три.

Во-первых, *недостаточное покрытие высокоскоростным интернетом мест рубок* или полное отсутствие какой-либо связи. Это лишает возможности получать информацию в режиме онлайн. И это основная проблема. Во-вторых, *злонамеренное действие оператора*, заметившего определенный инцидент. И, наконец, *обыкновенный недосмотр*.

K2. Коэффициент качества СППР. Его можно рассчитать по следующей формуле:

$$K2 = \left(1 - \sum_{i=1}^n Kc\right) * 100\%,$$

где Kc – коэффициент снижения качества.

Что вносит вклад в снижение качества получаемого результата? Сама аппаратура (датчики, АЦП и т. п.), используемые алгоритмы обработки аналогового сигнала, внешние наводки, а также нельзя исключать ошибки оператора.

Кроме того, необходимый коэффициент качества может определяться самим заказчиком в ТЗ.

Исходя из вышеописанного, K2 должен находиться в диапазоне 85–95 %.

K3. Коэффициент доступности⁸ определяется как

$$K3 = \frac{AST - DT}{AST} * 100\%,$$

где AST – согласованное время предоставления услуги; DT – сумма простоев за период.

Современные лесные машины позволяют работать круглые сутки, исключая длительность регламентированных временных приостановок функционирования техники. Исходя из этого, рассчитаем $K3$ (период измерений – неделя, предполагаем, что допускается час простоя системы каждый день): $((24*7) - 7) / 24*7 = 95,8\%$.

Вывод

В заключение стоит отметить, что из года в год использование СППР в лесной отрасли только увеличивается. Как отмечают E. Ortiz-Urbina, J. González-Pachón, «...из 134 статей, посвященных принятию решений в данной отрасли, в 22-х (16 % от всего количества) авторы упоминали применение СППР для решения поставленных задач» [16].

Можно заметить, что использование СППР для оценки негативного влияния лесных машин на окружающую среду приведет к определенным улучшениям в сфере экологической безопасности.

В большей степени это касается предотвращения эрозии лесных почв, а также предупреждения снижения плодородия, вызванного нерациональным использованием и химическим загрязнением.

Например, среди рассмотренных ситуаций:

- сокращение времени разложения нефтепродуктов в лесной подстилке в ~ 3 раза, в почве в ~ 7 раз (см. рис. 4, b);
- предотвращение ~ 30 % возможных случаев превышения необходимого уровня колейности, первый проход (см. рис. 6).

Более того, СППР оказывает положительное влияние на показатели «Индустрии 4.0»: например, значение коэффициента эффективности вырастет ~ на 20 %.

⁸ http://smartsourcing.ru/blogs/teoriya_metodiki_i_standarty/2210

Список литературы

1. **Васенёв М. Ю.** «Индустрія 4.0»: использование информационных технологий для снижения техногенного воздействия лесозаготовительных машин // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7, no. 10. С. 50–58.
2. **Nevalainen P., Salmivaara A., Ala-Piomäki J. et al.** Estimating the Rut Depth by UAV Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 12, p. 1279. DOI 10.3390/rs9121279
3. **Gézero L., Antunes C.** Road Rutting Measurement Using Mobile LiDAR Systems Point Cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 9, p. 404. DOI 10.3390/ijgi8090404.
4. **Геловани В. А., Башлыков А. А., Бритков В. Б., Вязилов Е. Д.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 304 с.
5. **Еремеев А. П., Симонов Д. Н., Чибизова Н. В.** Реализация прототипа системы поддержки принятия решений реального времени на основе инструментального комплекса G2 // Программные продукты и системы. 1996. № 3. DOI 10.15827/0236-235X
6. **Kobersy I. S., Shkurkin D. V., Zatonskiy A. V. et al.** Moving objects control under uncertainty. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 5, pp. 2830–2834.
7. **Ганина Я. О., Лаптев В. В.** Нечеткая производственная модель для оценки профессиональных качеств морских специалистов // Вестник Астрахан. го. техн. ун-та. Серия: Управление, вычисл. техн., информ. 2016. № 3. С. 101–108.
8. **Вязилов Е. Д.** Методы и средства работы с базами данных. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2012. 393 с.
9. **Бурмистрова О. Н., Просожих А. А., Хитров Е. Г и др.** Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Изв. вузов. Лесной журнал. 2021. № 3 (381). С. 101–116. DOI 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
10. **Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S.** The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia. *iForest*, 2020, vol. 13, iss. 6, pp. 531–540. DOI 10.3832/ifor3371-013
11. **Шайдуллина И. А., Антонов Н. А., Колесникова Н. Е. и др.** Испытание новых биотехнологий рекультивации нефтезагрязненных земель в условиях ОАО «Татнефть» // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. 2013. № 1. С. 168–173.
12. **Wronski E. B., Humphreys N.** A method for evaluating the cumulative impact of ground-based logging systems on soils. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, pp. 9–20.
13. **Abebe A., Tanaka T., Yamazaki M.** Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics*, 1989, vol. 26, no. 2, pp. 139–148.
14. **Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., ten Hompel M., Wahlster W.** Industrie 4.0 Maturity Index. *Managing the Digital Transformation of Companies*. Munich, Herbert Utz Verlag, 2017.
15. **Мень М. А., Батуркин А. Н., Морохоева И. П., Доробалюк С. А.** Отчет о результатах совместного эксперто-аналитического мероприятия «Анализ эффективности использования лесных ресурсов Российской Федерации в 2016–2018 годах». М., 2020.
16. **Ortiz-Urbina E., González-Pachón J., Diaz-Balteiro L.** Decision-Making in Forestry: A Review of the Hybridisation of Multiple Criteria and Group Decision-Making Methods. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 5, p. 375. DOI 10.3390/f10050375

References

1. **Vasenev M. Yu.** “Industry 4.0”: information technologies utilization for reducing the man-made impact of tree harvesting machines. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 10, pp. 50–58. (in Russ.)
2. **Nevalainen P., Salmivaara A., Ala-Ilomäki J. et al.** Estimating the Rut Depth by UAV Photogrammetry. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 12, p. 1279. DOI 10.3390/rs9121279
3. **Gézero L., Antunes C.** Road Rutting Measurement Using Mobile LiDAR Systems Point Cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, no. 9, p. 404. DOI 10.3390/ijgi8090404.
4. **Gelovani V. A., Bashlykov A. A., Britcov V. B., Vyazilov E. D.** Intellegent DSS in the emergency situations with using an information about natural environment condition. Moscow, Editorial URSS, 2001, 304 p. (in Russ.)
5. **Eremeev A. P., Simonov D. N., Chibizova N. V.** Realization of the real-time DSS prototype based on the instrumental complex G2. *Program products and systems*, 1996, no. 3. (in Russ.) DOI 10.15827/0236-235X
6. **Kobersy I. S., Shkurkin D. V., Zatonskiy A. V. et al.** Moving objects control under uncertainty. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 5, pp. 2830–2834.
7. **Ganina Ya. O., Laptev V. V.** Fuzzy productive model for evaluation of professional qualities of sea experts. *Vestnik Astrakhan State Technical Uni. Series: Management, Computer Sciences and Informatics*, 2016, no. 3, pp. 101–108. (in Russ.)
8. **Vyazilov E. D.** Methods and techniques for operating with databases. Obninsk, IATE MEPHI, 2012, 393 p. (in Russ.)
9. **Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G. et al.** Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils. *Lesnoy Zhurnal*, 2021, no. 3 (381), pp. 101–116. (in Russ.) DOI 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116
10. **Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S.** The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the Boreal Forests, Russia. *iForest*, 2020, vol. 13, iss. 6, pp. 531–540. DOI 10.3832/ifor3371-013
11. **Shaidullina I., Antonov N., Kolesnikova N. et al.** Experimental study of novel biotechnologies for restoration of oil-contaminated lands in OAO Tatneft. *Materials of the science session of the Almetyevsk State Oil Institute*, 2013, no. 1, pp. 168–173. (in Russ.)
12. **Wronski E. B., Humphreys N.** A method for evaluating the cumulative impact of ground-based logging systems on soils. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, pp. 9–20.
13. **Abebe A., Tanaka T., Yamazaki M.** Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics*, 1989, vol. 26, no. 2, pp. 139–148.
14. **Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., ten Hompel M., Wahlster W.** Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies. Munich, Herbert Utz Verlag, 2017.
15. **Men M. A., Baturkin A. N., Morokhoeva I. P., Dorobaliuk S. A.** Report of results of the co-operative expert and analytical event “Analysis of the efficiency of use of forest resources in Russia, 2016–2018”. Moscow, 2020. (in Russ.)
16. **Ortiz-Urbina E., González-Pachón J., Diaz-Balteiro L.** Decision-Making in Forestry: A Review of the Hybridisation of Multiple Criteria and Group Decision-Making Methods. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 5, p. 375. DOI 10.3390/f10050375

Информация об авторе

Михаил Юрьевич Васенёв, аспирант

Information about the Author

Mikhail Yu. Vasenev, Postgraduate Student

*Статья поступила в редакцию 11.12.2021;
одобрена после рецензирования 01.02.2022; принята к публикации 01.02.2022
The article was submitted 11.12.2021;
approved after reviewing 01.02.2022; accepted for publication 01.02.2022*