



УДК 630.376:629.733.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

АЭРОСТАТИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВОК В ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНАХ

А.В. Абузов, д-р техн. наук, проф.; Researcher ID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

П.Б. Рябухин, д-р техн. наук, проф.; Researcher ID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, д. 136,
г. Хабаровск, Россия, 680042; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 10.12.20 / Принята к печати 16.02.21

Аннотация. Проанализирована ситуация, сложившаяся на большинстве лесозаготовительных предприятий дальневосточного региона: истощение легкодоступных лесных территорий, которые возможно осваивать традиционными способами заготовки с использованием наземных комплексных систем. В последние годы область лесозаготовок смещается в лесные массивы, которые имеют признаки труднодоступности и экологической зависимости и, как правило, окружены горными склонами с резким перепадом высот. Такие характеристики лесного фонда отрицательно влияют на себестоимость лесозаготовительных работ. В этой связи возникает необходимость поиска новых способов заготовки и транспортировки древесины, позволяющих повысить не только рентабельность выполняемых работ, но и их экологическую и технологическую составляющие. Проанализированы исследования отечественных и зарубежных авторов в области изучения возможностей использования различных транспортных средств для доставки древесины от мест ее заготовки на труднодоступных лесных территориях до пунктов реализации. Сделан вывод, что единственной альтернативой автомобильному транспорту, используемому в настоящее время, могут быть только воздушные транспортные средства на основе аэростатической подъемной силы (дирижабли гибридного типа). Показаны результаты теоретических исследований по разработке методики поиска наиболее эффективной модели дирижабля среди всех существующих конструкций, функционирующих в конкретных природно-климатических условиях, и сравнения ее с другими видами транспортных средств для труднодоступной местности. Предлагается метод многокритериального структурно-параметрического синтеза на основе принципов оптимального управления с разработкой комплексной целевой функции. Чтобы оценить эффективность и возможность применения конкретных моделей аэростатических летательных аппаратов в труднодоступных лесных массивах предлагается оригинальная методика, базирующаяся на возможностях математических систем и способов управления базами данных. Проведенные исследования актуальны для организаций, имеющих потребность доставки лесной продукции, заготовленной на труднодоступных лесных территориях, воздушным транспортом.

Для цитирования: Абузов А.В., Рябухин П.Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 110–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

Ключевые слова: труднодоступные лесные территории, воздушные транспортные средства, дирижабль, компромиссное решение, целевая функция, алгоритм, компьютерная программа, заготовка древесины.

AEROSTATIC AIRCRAFT FOR LOGGING IN REMOTE FOREST AREAS

Aleksandr V. Abuzov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3854-2021](https://orcid.org/0000-0003-1082-9392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-9392>

Pavel B. Ryabukhin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAK-3906-2021](https://orcid.org/0000-0003-1735-1942),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>

Pacific National University, ul. Tikhookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680042, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru, 000340@pnu.edu.ru

Original article / Received on December 10, 2020 / Accepted on February 16, 2021

Abstract. The article analyzes the situation of the majority of logging enterprises in the Far Eastern region associated with the depletion of easily accessible forest areas, which can be developed by traditional logging methods using ground-based integrated systems. Recently, the sphere of logging has shifted to woodlands that show signs of remoteness and ecological dependency and are usually surrounded by mountain slopes with sharp differences in elevation. Such forest fund characteristics negatively affect the cost of logging operations. The authors note that in this regard, there is a need to search for new alternative methods of timber logging and transportation that not only improve the profitability of the work being done, but also its environmental and technological sides. The paper analyzes the studies of local and foreign authors in the field of studying the possibilities of using various vehicles for delivering timber from logging sites in remote forest areas to the distribution points. It is concluded that the only alternative to the currently used road transport is aerial vehicles based on aerostatic lift (hybrid type airships). The article shows the results of theoretical studies on the development of a methodology for finding the most effective model of an airship from the entire range of existing structures operating in specific natural and climatic conditions and comparing it with other types of vehicles for remote forest areas. A method for multi-criteria structural and parametric synthesis based on optimal control principles with the development of a complex target function is proposed. An original technique based on the capabilities of mathematical systems and methods of database management is proposed in order to assess the effectiveness and the possibility of using specific models of aerostatic aircraft in remote forests. The conducted studies are relevant for organizations that need to use air transport to deliver forest products harvested in remote forest areas to consumers.

For citation: Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerostatic Aircraft for Logging in Remote Forest Areas. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 110–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-110-127

Keywords: remote forest areas, aerial vehicles, airship, compromise solution, target function, algorithm, computer program, timber logging.

Введение

Для ряда лесных регионов России, в частности для Дальневосточного федерального округа (ДФО), лесная промышленность является одной из основных составляющих экономического развития. Однако вследствие интенсивной заготовки древесины, продолжающейся на протяжении многих лет, у большинства лесозаготовительных предприятий дальневосточного региона возникла проблема, связанная с истощением легкодоступных лесных территорий, которые возможно осваивать традиционными способами заготовки с использованием наземных комплексных систем без значительных капиталовложений в строительство транспортной инфраструктуры.

Область распространения лесозаготовительных операций в ДФО планомерно смещается из наиболее доступных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости: с плотно расположенными на них реками, озерами и болотами, как правило, в окружении горных склонов с резким перепадом высот. Уже сейчас остро встает вопрос о дефицитном состоянии лесного фонда ДФО ввиду его неспособности в ближайшем будущем обеспечить отрасль качественной и рентабельно доступной древесиной [2, 23, 29, 32].

По результатам исследований, доступный для нормальной эксплуатации лесосечный фонд в ДФО занимает не более 40 % лесопокрытых земель, при этом необходимо учитывать, что его освоение требует строительства и содержания лесовозных дорог. Труднодоступные лесные территории, которые представлены горными лесными массивами, лесисто-болотистыми участками, лесными участками с сильно развитой гидрологической сетью, в целом по дальневосточному региону составляют около 20 % [3].

Разработка данных участков только с помощью наземных технологий, как показывает опыт многих лесозаготовительных предприятий, является не всегда эффективной, а зачастую невозможной из-за высоких финансовых, временных и трудовых затрат, которые делают лесозаготовительный процесс на данных территориях нерентабельным.

В этой связи возникает необходимость поиска альтернативных способов заготовки и транспортировки древесины, позволяющих повысить не только рентабельность выполняемых работ, но и их экологичность и технологичность.

Цель исследований – поиск наиболее эффективной модели дирижабля во всей гамме существующих конструкций, работоспособных в конкретных природно-климатических условиях функционирования лесопромышленных предприятий ДФО (температурный режим, рельеф местности, скорость и направление ветра и т. д.).

Объекты и методы исследования

Транспортная составляющая лесозаготовительных операций является одним из основных факторов, который сдерживает увеличение объемов использования расчетной лесосеки, а точнее часто делает данные операции экономически нецелесообразными. Особенно это проявляется в условиях горной местности, где присутствует сложная мозаичность рельефа при наличии участков с резким перепадом высот и обширной гидрологической сетью.

Такая ситуация приводит к дополнительным переместительным операциям в процессе освоения лесного фонда, при этом эффективность и рентабельность лесопромышленного производства резко падают [33, 34].

По нормам проектирования дорог на территории лесосечного фонда плотность транспортной сети должна составлять не менее 1 км дороги на 8–10 тыс. м³ заготовленной древесины или 0,5–1,0 км/км². В настоящее время до 85 % всех проложенных в последние годы лесных дорог по категории «усы–ветки» строятся со значительными технологическими нарушениями и через год эксплуатации становятся непригодными для дальнейшего использования. Кроме того, большинство лесных дорог после того, как эксплуатационный лес на данной территории выбран, остаются заброшенными и невостребованными [34].

На рис. 1 представлено процентное соотношение протяженности составных частей дорожной сети и их загрузки по времени. Исследования, проведенные в Тихоокеанском государственном университете [2], показывают, что при годовой расчетной лесосеке в 11 млн м³ в год необходимо строить до 1120 км автодорог круглогодичного действия. Эта потребность оценивается ориентировочно в сумму от 3,5 до 5,5 млрд р. в зависимости от рельефных условий и гидрологии.

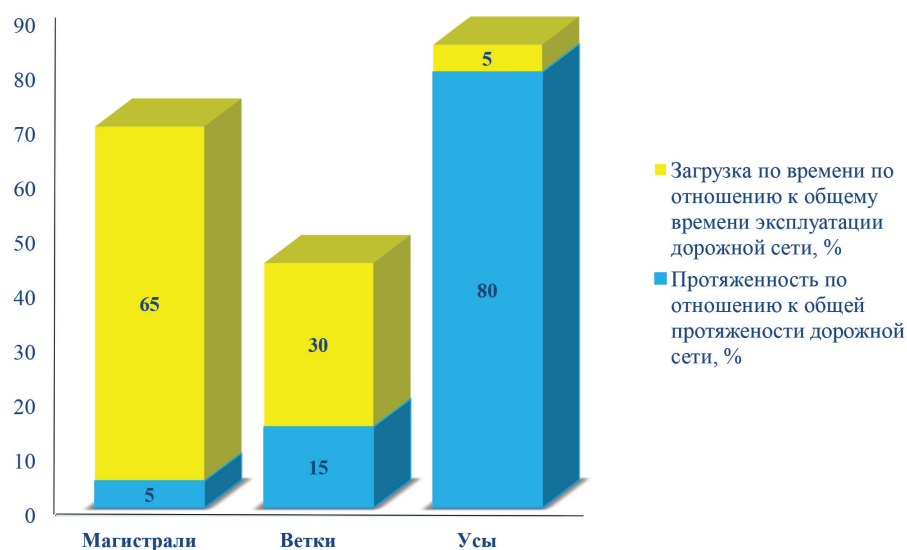


Рис. 1. Соотношение протяженности составных частей дорожной сети и загрузки по времени

Fig. 1. The ratio of the length of the road network constituents and the load over time

При существующих тарифах выполнения работ всего цикла лесопромышленного производства на лесозаготовительных предприятиях с годовым объемом более 300 тыс. м³ затраты на транспортировку заготовленной древесины достигают 48 % от общей себестоимости продукции в виде круглых лесоматериалов, а капитальные вложения в строительство и содержание лесных дорог, приобретение (и обслуживание) автомобильного подвижного состава на весь период освоения сырьевой базы – 75 %. Значительные площади спелого древостоя в ДФО находятся не только на территориях с наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов, но и в местах с сильно

переувлажненными грунтами, заболоченностью и топиями [1, 13]. Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах, нижняя часть которых часто соприкасается с гидрологическими системами, такими как болота и реки. Этот фактор также отрицательно влияет на себестоимость лесозаготовительных работ. Из-за смещения сроков освоения лесного фонда (в связи с сезонной транспортной недоступностью отдельных участков) увеличиваются экономические риски предприятия, приводящие к срыву контрактов, сокращению работников и банкротству.

Для снижения экономической, технологической и экологической нагрузок на лесопромышленный комплекс необходимы не только улучшение эксплуатационных характеристик лесовозных дорог и снижение стоимости строительства 1 км подъездных путей, но и внедрение в лесозаготовительный цикл новых специализированных транспортных средств.

Реализация работ по транспортному освоению лесных территорий предполагает наличие первоначальной информации о:

- доступности территории относительно транспортного расстояния;
- географических, гидрологических и лесохозяйственных условиях;
- наличия видов и подвидов транспортных коридоров;
- наличия основных действующих пунктов перегрузки и складирования древесного сырья (железные дороги, порты, таможенные и пограничные пункты), перерабатывающих заводов, пунктов энергопотребителей (биотопливо и пиролизный газ) и других потребителей древесины.

С использованием данной информации формируется структура доступности лесозаготовительных территорий относительно размещения потребителей древесины как продукта или источника, создающего дополнительные технологические и хозяйственные процессы. Анализ лесного фонда различных лесопромышленных предприятий ДФО показал, что по степени удаленности площадей, на которых сконцентрированы основные запасы спелой и качественной древесины, территории можно разделить на четыре зоны доступности (рис. 2, рис. 3).



Рис. 2. Структура зон доступности лесозаготовительных территорий ДФО

Fig. 2. Structure of availability zones of forest exploitation territories of the Far Eastern Federal District

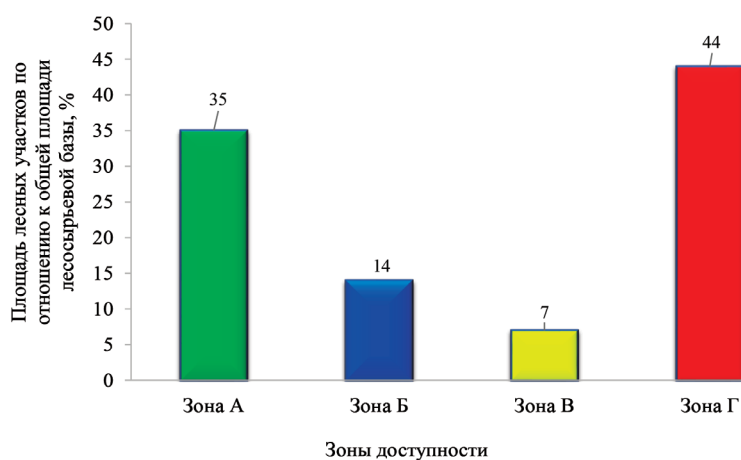


Рис. 3. Соотношение зон доступности и общей площади лесного фонда ДФО

Fig. 3. Percentage ratio of the availability zones and the total area of the forest fund of the Far Eastern Federal District

Как было выявлено в ходе анализа ряда отечественных и зарубежных теоретических и прикладных исследований, комплексными технологическими системами, способными транспортировать заготовленную древесину, обеспечивая при этом эффективную работу по преодолению водных преград и заболоченных мест, могут являться только воздушные транспортные средства на основе аэростатической подъемной силы – дирижабли гибридного типа (комбинация аэростата с винтокрылым летательным аппаратом, их развитие связано с попыткой получить более высокие аэродинамические характеристики, чем у классических управляемых аэростатов). Кроме того, данные средства способны одновременно с переместительно-транспортными операциями с заготовленной древесиной обеспечить доставку на труднодоступные лесные участки рабочего персонала, техники, оборудования и элементов инфраструктуры [4, 20, 26].

Говоря о комплексной эффективности дирижабля как вида транспортно-го средства, возможного к использованию в лесном комплексе на различных операциях (подготовительные, инфраструктурные, вспомогательные, лесозаготовительные, транспортные), необходимо отметить его широкие возможности при решении задач по защите и восстановлению лесов.

Так, на этапе подготовительных работ, которые в первую очередь связаны с инфраструктурным обеспечением лесозаготовительного процесса, использование крупнотоннажных дирижаблей может полностью исключить затраты на строительство и содержание лесных дорог и дорожных инженерных сооружений. Применение в лесопромышленном производстве модульных технологий компоновки деревообрабатывающих цехов позволит оперативно возводить их в точках локации лесозаготовок с последующей перебазировкой данного технологического оборудования в планируемые места проведения будущих работ.

С начала 70-х гг. прошлого века создан и испытан ряд образцов различных аэростатических летательных аппаратов (АЛА), в число функций которых входила и транспортировка древесины из труднодоступных мест.

Преимущественно это были гибридные дирижабли, информация об основных моделях которых представлена на рис. 4 и в табл. 1.

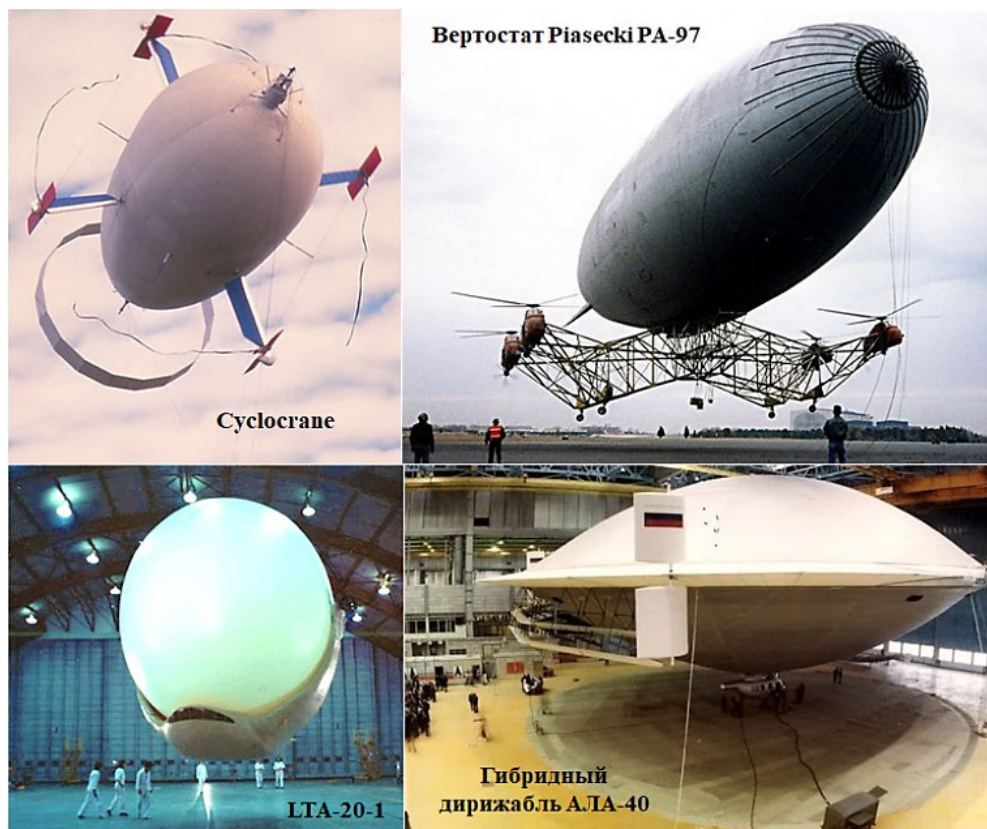


Рис. 4. Основные виды созданных гибридных дирижаблей

Fig. 4. The main types of created hybrid airships

АЛА имеет значительно большую по сравнению со всеми существующими транспортными средствами удельную грузоподъемность (отношение массы перевозимого им груза к полной полетной массе), обладает высокой транспортной производительностью (произведение веса перевозимого груза на дальность транспортировки) и более низкой удельной стоимостью конструкции (отношение стоимости конструкции к единице транспортной производительности) за счет большой грузоподъемности и сравнительно малого расхода топлива [3, 14, 26, 29]. Наличие жесткой оболочки у конструкций АЛА нового поколения, позволяющей осуществлять стоянки эллингов под открытым небом, и специально разработанный метод скоростного амортизированного причаливания с последующей автоматической швартовкой на поворотную площадку причального сооружения дают возможность снижения стоимости эксплуатации в отличие от конструкций дирижаблей 70–80 гг. прошлого столетия: процесс их швартовки был сложен и трудоемок, требовал участия многочисленной наземной команды [31].

Таблица 1

Основные виды созданных экспериментальных гибридных дирижаблей, предназначенных для грузовых и транспортно-монтажных операций

| Модель | Страна-разработчик, производитель | Год проведения производственных испытаний | Грузоподъемность, т | Форма | Габариты, м | Объем оболочки, м ³ | Способ создания подъемной силы и управления ей |
|--------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|---|--|--------------------------------|--|
| АЛА-40 | СССР/РФ | 1991–92 | 2,15–3,5 | Дискообразная | Д = 40 | 10 660 | Аэростатический + изменение температуры горячего воздуха и гелия + использование винтомоторных установок |
| Аэростане | США, Канада | 1972–78 | Прототип без загрузки | Сферическая с 4 лопастями по экватору | Д = 6; Р = 13 | 30 | Аэростатический + эффект Магнуса |
| CycloStane | США, Канада | 1979–82 | 1,8 | Эллипсоидная с ротороной ситемой лопастей | Дл = 56; Д = 21; В = 21; Р = 21 | 9350 | Аэростатический + эффект Магнуса |
| Piasecki PA-97 Heli-Stat | США | 1986 | 21,5 | Эллипсоидная | Дл = 104,5; Д = 34; Р = 57 | 28 300 | Использование винтомоторных установок + аэростатический |
| LTA-20-1 | США | 1981 | Прототип без загрузки | Сферическая | Д = 6,1 | 30 | Аэростатический + эффект Магнуса |

Примечание: Д – диаметр корпуса; Дл – длина корпуса; В – ширина корпуса по миделю; Р – размах с учетом размеров лопастей.

В настоящее время глубоко проработаны и готовы к промышленному выпуску две конструкции гибридного дирижабля: «Атлант-30» грузоподъемностью до 16 т и «Атлант-100» грузоподъемностью до 60 т (при дальности перемещения до 2000 км и скорости движения 130–150 км/ч) (рис. 5) [20].



Рис. 5. Общий вид гибридного дирижабля «Атлант»

Fig. 5. General view of the ATLANT hybrid airship

Дирижабли с большой грузоподъемностью имеют ряд преимуществ перед вертолетами при перевозке грузов значительной массы: возможность транспортировки неделимых грузов, по габаритам превышающим габариты дирижабля; отсутствие необходимости посадки на специально оборудованные места; работа без дозаправки в течение длительного времени и др. [1, 31].

Для реализации цели исследования предлагается сформулировать ее как задачу многокритериального структурно-параметрического синтеза на базе принципов оптимального управления [10, 21, 22, 27, 28]. Основополагающие критерии управления в области лесопромышленного производства – эффективность производственно-технологических и лесохозяйственных мероприятий. В качестве параметров принимаются природно-климатические условия на отведенных в рубку лесных участках, а управляющих воздействий – конструктивно-кинематические параметры дирижаблей. Выбор «наилучшего» решения в этом случае сводится к нахождению минимального отклонения от индивидуальных оптимальных значений параметров и структуры по всем критериям одновременно [15, 19, 24, 25, 30].

Поиск оптимальных систем АЛА для выполнения всего комплекса работ с математической точки зрения можно представить как задачу структурно-параметрического синтеза оборудования и технологии его применения в рамках природно-климатических условий лесозаготовительного участка, при которых показатели качества стремятся к своим экстремальным значениям [5, 8].

Анализируемые (эксплуатационные и кинематические) параметры исследуемых моделей оборудования (дирижаблей) X_0 и параметры технологии их использования X_1 описываются некоторыми идентификаторами (идентификатор – уникальный признак объекта, позволяющий отличать его от других объ-

ектов), учитывающими все многообразие характеристик оборудования. Обозначим эти идентификаторы как I_s ($s = 1; 2; \dots; k$), где s – номер идентификатора. Их числовые значения зависят от ряда конструктивно-кинематических параметров АЛА, реализуемых технологических операций, природно-климатических условий мест эксплуатации оборудования.

Задача поиска оптимальной модели оборудования заключается в поиске таких значений его параметров для лесорастительных условий, при которых функционалы I_s достигают экстремальных значений в области заданных ограничений [22, 24]:

$$\Gamma_s < I_s < \Gamma_s,$$

где Γ_s, Γ_s – пограничные (нижние и верхние) значения I_s .

Математическая постановка задачи поиска оптимальных вида и модели оборудования рассматривается как минимизация векторного критерия:

$$(\Xi): \Xi = \phi(W, T, D, M, B), \quad (1)$$

где W, T, D, M, P, B – диапазоны целевых функционалов;

$$\max W_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) W(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min T_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) T(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\max D_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) D(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min M_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) M(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t;$$

$$\min B_\Sigma = \int_{t_n}^{t_k} \int_{Y_1 \min}^{Y_1 \max} \dots \int_{Y_p \min}^{Y_p \max} \phi(y, t) B(X_M, X_T, Y) d_{y1} d_{y2} \dots d_{yp} d_t,$$

t_n, t_k – интервал времени функционирования оборудования в заданных природно-климатических и производственных условиях; $Y_i \min, Y_i \max$ – пограничные значения i -й характеристики разрабатываемых лесных участков; Y_p – природно-климатические условия эксплуатации оборудования; $\phi(y, t)$ – обобщенная совместная плотность распределения природно-климатических параметров лесных участков; X_M – эксплуатационные (геометрические и кинематические) параметры оборудования; X_T, Y – параметры выполняемых технологических операций, природно-климатических и производственных условий, в которых используется оборудование соответственно; $W(X_M, X_T, Y), T(X_M, X_T, Y), D(X_M, X_T, Y), M(X_M, X_T, Y), B(X_M, X_T, Y)$ – математические модели производительности, транспортной энергоёмкости, удельной грузоподъёмности, материалоемкости и удельных капитальных вложений аэростатических летательных аппаратов соответственно.

Физический смысл данной постановки задачи сводится к поиску таких параметров машин (X_M) и технологических процессов (X_T) из области их реализуемости для заданных состояний предмета труда (y) (дерево, хлыст и т. д.),

которые в различных природных условиях (yp) минимизируют затраты энергии и времени на осуществление технологического процесса, потери древесного сырья, повреждения почвы и оставляемых на лесосеке деревьев, молодняка и подроста.

Таким образом, сущность предлагаемой постановки задачи определяется как выявление таких конструктивно-кинематических параметров оборудования и параметров технологии их использования, которые в различных природно-климатических условиях эксплуатации данного оборудования минимизируют величину векторного критерия (1).

Как было сказано, процесс поиска оптимального вида (модели) АЛЖ и установления уровня его эффективности при использовании в различных природно-климатических условиях сводится к решению задачи векторного нелинейного программирования [24]. Анализируемые критерии оптимизации носят двойственный характер, поэтому для комплексного учета возможных значений частных критериев возьмем векторный критерий оптимальности, позволяющий решить задачу многокритериальной оптимизации [9, 12], результат которой будет в совокупности компромиссным для вектора

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = [W_\Sigma, T_\Sigma, D_\Sigma, M_\Sigma, B_\Sigma].$$

Решением задачи по поиску компромиссного решения $X^* \in D^*$ является нахождение такой точки, для которой справедливо неравенство [31]:

$$\Xi(X^*, X^*, Y) \leq \Xi(X, X, Y) \forall X^* \in D^*.$$

Таким образом, если для любой составляющей верно условие $\Xi(X_M^*, X_T^*, Y) \leq \Xi(X_M, X_T, Y)$, то по крайней мере для одного из исследуемых критериев найдется точка, в которой неравенство $\Xi_i(X_M^*, X_T^*, Y) > \Xi_i(X_M, X_T, Y)$ выполняется.

Количество всех эффективных точек определено как область компромиссов, оптимальных по Паретто [22, 25], из чего следует вывод о невозможности дальнейшего улучшения параметра одного из частных критериев при условии, что хотя бы один из остальных не ухудшил при этом своего значения. Таким образом, для нахождения экстремума компромиссного вектора (по Паретто) необходимо перейти к задаче нелинейной оптимизации сформированной скалярной функции цели:

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = \phi\{W_\Sigma, T_\Sigma, D_\Sigma, M_\Sigma, B_\Sigma\}.$$

Сформируем свертку критериев:

$$\Xi(X_M, X_T, Y) = \sum_{i=1}^s \eta_i [\hat{L}] \forall \eta_i \geq 0, 0; \sum_{i=1}^s \eta_i = 1, 0;$$

$\hat{\Xi}(X_M, X_T, Y) = (L(X_M, X_T, Y) - L_i^*) / L_i^*$ – для минимизируемых критериев (транспортная энергоёмкость, материалоемкость, удельные капитальные вложения); $\hat{\Xi}(X_M, X_T, Y) = L_i^* / (L(X_M, X_T, Y) - L_i^*)$ – для максимизируемых критериев (производительность, удельная грузоподъемность).

Здесь L – дальность полета, км; L_i^* – значение i -го критерия, определенное при поиске оптимальных параметров с учетом единственного i -го показателя качества, η_i – коэффициент приоритетности i -го показателя качества.

Таким образом, комплексная целевая функция может быть определена в виде

$$\Xi = \left[\begin{array}{c} \frac{W_{\Sigma}^*}{W_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - W_{\Sigma}^*} - \frac{T_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - T_{\Sigma}^*}{T_{\Sigma}^*} - \frac{D_{\Sigma}^*}{D_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - D_{\Sigma}^*} \\ - \frac{M_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - M_{\Sigma}^*}{M_{\Sigma}^*} - \frac{B_{\Sigma}(X_M, X_T, Y) - B_{\Sigma}^*}{B_{\Sigma}^*} \end{array} \right] \Rightarrow \min, (2)$$

где $W_{\Sigma}^*, T_{\Sigma}^*, D_{\Sigma}^*, M_{\Sigma}^*, B_{\Sigma}^*, W_{\Sigma}, T_{\Sigma}, D_{\Sigma}, M_{\Sigma}, B_{\Sigma}$ – диапазон экстремальных и текущих значений частных критериев соответственно.

Показатели качества аэростатических летательных аппаратов представлены в виде математических зависимостей [3, 15]:

производительность, т·км/ч,

$$W = G_{\text{кз}} V_{\text{кр}},$$

где $G_{\text{кз}}$ – коммерческая загрузка, т; $V_{\text{кр}}$ – крейсерская скорость полета, км/ч;

транспортная энергоемкость, кВт·ч/т·км,

$$T = \frac{N_{\text{кр}}^{\text{ср}}}{W},$$

$N_{\text{кр}}^{\text{ср}}$ – средняя мощность двигателей на крейсерском режиме, кВт;

удельная грузоподъемность

$$D = \frac{G_{\text{гр}}}{G_{\text{взл}}},$$

$G_{\text{гр}}$ – масса перевозимого груза, т; $G_{\text{взл}}$ – взлетная масса АЛА, т;

материалоемкость, т,

$$M = \frac{G_{\text{пуст}}}{G_{\text{гр}}},$$

$G_{\text{пуст}}$ – масса порожнего АЛА, т;

транспортная производительность, т·км,

$$P = G_{\text{гр}} L;$$

удельные капитальные вложения

$$B = \frac{0,1\Pi_{\text{л.а}}}{G_{\text{гр}} V_{\text{кр}}^{\text{ср}} T_{\text{нал}}},$$

$\Pi_{\text{л.а}}$ – цена летательного аппарата, р.; $T_{\text{нал}}$ – годовой налет часов, ч.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки эффективности и возможности применения конкретных моделей АЛА в труднодоступных лесных массивах предлагается методика, базирующаяся на возможностях числовых математических систем и способов управления базами данных (БД). Пример алгоритма работы по предлагаемой методике приведен на рис. 6 на основе языка UML в виде пошагового движения [6, 7, 16]. Такой способ оценки предполагается реализовать в виде компьютерной программы (КП), блок-схема работы по предлагаемой методике учитывает все специфические свойства компьютерных программ.

Для проектирования внутренней логической структуры программы использована диаграмма классов. После спецификации возможностей программы

и разработки основных алгоритмов предполагается ее моделирование на языке UML в рамках унифицированного процесса моделирования. Согласно UML, построение диаграмм производится в установленной последовательности. После моделирования программы, реализующей методику оценки применимости и эффективности моделей дирижаблей, планируется разработка этапа создания файлов расчета в математической системе MathCAD и программирования в системе управления БД Microsoft Access [11, 18].



Рис. 6. Пошаговое движение UML «Оценка применимости специализированного лесотранспортного оборудования»

Fig. 6. UML stepwise motion “Evaluating the Applicability of Specialised Forest Transport Equipment”

Первый шаг: КП позволяет заказчику дать самостоятельную оценку возможности использования всех внесенных в нее моделей анализируемого оборудования. При этом устанавливаются и интерактивно удаляются из БД модели, которые не применимы из-за существующих нормативно-правовых, конструктивных или технологических ограничений. Второй шаг: КП оценивает применимость моделей оборудования. Оценка осуществляется пошаговой проверкой массива данных для каждой модели АПА по климатическим и лесорастительным характеристикам разрабатываемых лесных территорий (сезонному температурному режиму, скорости и направлению ветра, рельефу местности, направлению доставки груза относительно мест заготовки и др.). По итогам реализации первых четырех шагов представленной блок-схемы для каждой модели оборудования устанавливается результирующий массив разрабатываемых лесных территорий, на площади которых применима данная модель.

Пятый шаг: КП путем интегрирования полученной информации по всем лесным участкам в пределах отведенной в рубку территории рассчитывает для рассматриваемой модели объем древесины, возможный к доставке на центральный склад. Последний шаг: установка применимости данной модели по продолжительности ее эксплуатации в конкретных климатических и лесорастительных условиях. После этапа определения модели АЛА по критерию ее применимости (минимизация комплексной целевой функции (2)) проводится его сравнительная экономическая оценка с другими типами летательных аппаратов по методике, представленной в [17]. Пример алгоритма работы по данной методике представлен на рис. 7.



Рис. 7. Пошаговое движение UML «Оценка экономической эффективности специализированного лесотранспортного оборудования»

Fig. 7. UML stepwise motion “Evaluating the Economic Efficiency of Specialised Forest Transport Equipment”

К вопросам сравнения АЛА с другими видами транспортных средств ученые-экономисты обращались неоднократно. Так, например, проводился сравнительный анализ основных характеристик современных моделей АЛА и вертолетов, устанавливались области их применения, определялись экономически выгодные виды работ и т. п. [1, 4, 20].

Сравнительную оценку экономической эффективности различных моделей АЛА и наземного автомобильного транспорта в лесопромышленном комплексе предполагается осуществить также в виде КП.

Результаты предварительных расчетов при сравнении различных видов транспортных средств для доставки лесной продукции (на примере пиловочника) от мест заготовки до склада, расположенного на расстоянии 50 км, представлены в табл. 2. Значения анализируемых параметров для автолесовозов получены из годовых финансовых отчетов лесопромышленных предприятий Хабаровского края с учетом эксплуатации этих машин на уже проложенной сети лесных дорог.

Таблица 2

Показатели основных эксплуатационных затрат

| Параметр | Транспорт | | | | |
|--|--|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
| | Ми-26Т | Атлант-30 | Атлант-100 | Автолесовоз «Ивеко АМТ 633920» | |
| | | | | без учета строительства дорог и другой инфраструктуры | с учетом строительства комплекса лесовозных дорог общей протяженностью более 50 км |
| Стоимость 1 т·км, р. | 113,20 по статистическим данным за период 2015–2018 гг. | 35,31 по результатам расчета | 24,31 по результатам расчета | 7,18 по статистическим данным за период 2015–2018 гг. | 233,00–379,00 в зависимости от природно-производственных условий по статистическим данным за период 2015–2018 гг. |
| Топливная эффективность (расчетная), кг/т·км | 0,620 | 0,170 | 0,120 | 0,024 | 0,024 |

Если учесть, что в настоящее время в условиях дальневосточного региона на строительство и содержание 1 км лесовозной дороги затрачивается до 1,2–3,5 млн р. (средняя величина для всей сети дорог – ус, ветка, магистраль), то предварительные расчеты показывают увеличение стоимости доставки груза автолесовозным транспортом по сравнению с АЛА в 10–15 раз. При этом необходимо отметить, в настоящих расчетах не учитывалась экологическая составляющая – дополнительные затраты в виде штрафов за нарушение лесоводственных и экологических требований при строительстве сети лесовозных дорог.

Изучение вопроса экологических аспектов использования АЛА в лесопромышленном комплексе является для авторов одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

Заключение

Вопрос освоения труднодоступных лесных территорий актуален не только для Дальневосточного федерального округа, но и для всех регионов РФ, обладающих большими запасами лесных ресурсов и слаборазвитой дорожной сетью. На основании выполненных теоретических исследований сделан вывод, что для транспортировки заготовленной на труднодоступных лесных территориях древесины до пунктов ее реализации и специализированного технологического оборудования в места его эксплуатации (лесозаготовительные и деревообрабатывающие участки лесопромышленных предприятий) из всех существующих типов транспортных средств наиболее эффективными по критериям технической доступности и стоимости выполнения работ являются аэростатические летательные аппараты гибридного типа.

Предлагается способ выбора оптимальной модели аэростатического летательного аппарата для применения в лесопромышленном комплексе из существующих на текущий момент времени. Планируется дальнейшая работа по расширению возможностей разрабатываемых математической модели и программного обеспечения, что позволит осуществлять не только выбор оптимального аэростатического летательного аппарата, но и сравнительно-экономический анализ этого аппарата и других видов транспортных средств для доставки древесины от мест ее заготовки (на труднодоступных лесных территориях) до центрального склада лесопромышленного предприятия или потребителя продукции одним пакетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В. Лесотранспортные системы: новые возможности и перспективы развития // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопромышленного комплекса / отв. ред. А.П. Ковалев. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2013. С. 101–104. Abuzov A.V. Timber Transport Systems: New Opportunities and Prospects of Development. *State of the Forests, Actual Problems of Forestry and Forest Management*. Ed. by A.P. Kovalev. Khabarovsk, DalNIIHL Publ., 2013, pp. 101–104.

2. Абузов А.В., Казаков Н.В. Экологические последствия в лесных насаждениях, подверженных техногенному воздействию при лесозаготовительных и транспортных операциях // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28, № 1. С. 7–18. Abuzov A.V., Kazakov N.V. Ecological Consequences in Forest Stands Exposed to Technogenic Impact during Logging and Transport Operations. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [RUDN Journal of Ecology and Life Safety], 2020, vol. 28, no. 1, pp. 7–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-1-7-18>

3. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Транспортное освоение труднодоступных лесных территорий с применением летательных аппаратов. Хабаровск: ТОГУ, 2020. 115 с. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. *Transport Development of Hard-to-Reach Forest Territories Using Aircraft*. Khabarovsk, PNU Publ., 2020. 115 p.

4. Абузов А.В., Казаков Н.В., Дмитриева И.Н. Особенности использования вертолета на лесозаготовительных операциях // Инж. вестн. Дона. 2014. № 3. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2469> (дата обращения: 09.12.21). Abuzov A.V., Kazakov N.V., Dmitrieva I.N. Features the Use of Helicopters in Logging Operations. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 3.

5. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. М.: Наука, 1989. 88 с. Antushev G.S. *Methods of Parametric Synthesis of Complex Technical Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 88 p.
6. Боггс У., Боггс М. UML и Rational Rose: пер. с англ. М.: Лори, 2000. 582 с. Boggs W., Boggs M. *Mastering UML with Rational Rose*. Translated from English. Moscow, Lori Publ., 2000. 582 p.
7. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. М.: Бинوم, 1999. 560 с. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. *The Unified Modeling Language User Guide*. Translated from English. Moscow, Binom Publ., 1999. 560 p.
8. Волкович В.Л. Многокритериальные задачи и методы их решения // Кибернетика. 1998. № 5. С. 68–73. Volkovich V.L. Multi-Criteria Problems and Methods of Their Solution. *Kibernetika*, 1998, no. 5, pp. 68–73.
9. Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.Н. Моделирование развивающихся систем. М.: Наука, 1983. 350 с. Glushkov V.M., Ivanov V.V., Yanenko V.N. *Modeling of Developing Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 350 p.
10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 2002. 479 с. Gmurman V.E. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 479 p.
11. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. М.: СК Пресс, 1998. 352 с. D'yakonov V.P. *Handbook for MathCAD PLUS 7.0 PRO*. Moscow, SK Press Publ., 1998. 352 p.
12. Исаков В.Н. Элементы численных методов. М.: Академия, 2003. 192 с. Isakov V.N. *Elements of Numerical Methods*. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 192 p.
13. Ковалев А.П. Эколого-лесоводственные основы рубок в лесах Дальнего Востока. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2004. 270 с. Kovalev A.P. *Ecological and Forestry Bases of Felling in the Forests of the Far East*. Khabarovsk, DalNIILH Publ., 2004. 270 p.
14. Козловский В.Б., Худоленко О.В., Деревянко В.С. Аэростатические летательные аппараты для отраслей экономики. М.: Воздушный транспорт, 2007. 480 с. Kozlovsky V.B., Khudolenko O.V., Derevyanko V.S. *Balloon Aircrafts for Economic Sectors*. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2007. 480 p.
15. Лазарев И.А., Балужин В.М. Математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза сложных технических систем // Вопросы кибернетики: Системные принципы организации моделей развития. М., 2011. С. 105–123. Lazarev I.A., Baluzin V.M. Mathematical Formulation of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Complex Technical Systems. *Cybernetics Issues: System Principles of Organization of Development Models*. Moscow, 2011, pp. 105–123.
16. Леоненков А.В. Самоучитель UML. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 304 с. Leonenkov A.V. *UML Self-Study Guide*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2001. 304 p.
17. Малахова Л.А. Анализ себестоимости продукции лесозаготовок // Лесн. пром-сть. 1986. № 2. С. 27–28. Malakhova L.A. Analysis of the Cost of Logging Products. *Lesnaya promyshlennost'*, 1986, no. 2, pp. 27–28.
18. Плис А.И., Сливина Н.А. MathCAD: математический практикум для экономистов и инженеров. М.: Финансы и статистика, 1999. 656 с. Plis A.I., Slivina N.A. *MathCAD: Mathematical Workshop for Economists and Engineers*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1999. 656 p.
19. Рябухин П.Б. Моделирование технологических процессов в лесопромышленном комплексе. Хабаровск: ТОГУ, 2013. 168 с. Ryabukhin P.B. *Modeling of Technological Processes in the Timber Industry Complex*. Khabarovsk, PNU Publ., 2013. 168 p.

20. Рябухин П.Б., Абузов А.В. Горным лесоразработкам – средосберегающее технологическое оборудование // Лесн. хоз-во. 2008. № 6. С. 36–37. Ryabukhin P.B., Abuzov A.V. Mountain Logging – Environment-Saving Technological Equipment. *Lesnoye khozyaystvo*, 2008, no. 6, pp. 36–37.

21. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М., 2006. 110 с. Sobol' I.N., Statnikov R.B. *Optimal Parameter Choice in Problems with Many Criteria*. Moscow, Nauka Publ., 2006. 110 p.

22. Солодовников В.В., Зверев В.Ю. Применение методов теории автоматического управления и многокритериальной оптимизации для автоматизации проектирования АСУ ТП. М.: Машиностроение, 1984. 48 с. Solodovnikov V.V., Zverev V.Yu. *The Use of Methods of Automatic Control Theory and Multi-Criteria Optimization for Automated Control System Design Automation*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 48 p.

23. Урусов В.М. Дальний Восток: природопользование в уникальном ландшафте. Владивосток: Дальнаука, 2000. 340 с. Urusov V.M. *The Far East: Nature Management in a Unique Landscape*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 340 p.

24. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с. Himmelblau D. *Applied Nonlinear Programming*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1975. 536 p.

25. Якимович С.Б. Постановка и решение задачи синтеза и оптимального управления технологическими процессами лесозаготовок // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 96–103. Yakimovich S.B. Organization and Solution of Problem of Syntheses and Optimum Management of Technological Processes of Logging. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2003, no. 5, pp. 96–103.

26. Aglietti G.S. Dynamic Response of a High-Altitude Tethered Balloon System. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 6, pp. 2032–2041. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.43332>

27. *Balloon Logging Systems. Phase I – Analytical Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 110 p.

28. *Balloon Logging Systems. Phase II – Logistics Study*. Research Report. Portland, OR, Goodyear Aerospace Corporation, 1964. 171 p.

29. Developing a Forest Conservation Strategy for the Russian Far East. *Russia Country Report 2002/2003*. Ed. by H. Kakizawa, M. Inoue. Hayama, Japan, IGES, 2004, pp. 1–42.

30. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. *Pattern Classification*. New York, Wiley, 2000. 688 p.

31. Guimier D.Y., Vern Wellburn G. *Logging with Heavy-Lift Airships*. Technical Report No. TR-58. Vancouver, FERIC, 1984. 115 p.

32. Hughes N., Penner P. Today's Foresters Need Conflict Resolution Skills. *Forest Chron.*, 2001, vol. 77, no. 6, p. 563.

33. *People and Forest – Policy and Local Reality in Southeast Asia, the Russian Far East, and Japan*. Ed. by M. Inoue, H. Isozaki. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003. 374 p.

34. Sheingauz A. *Overview of the Forest Sector in the Russian Far East*. *Forest Trends*, 2004. 55 p. Available at: https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/imported/Sheingauz_rev.pdf (accessed 10.12.20).