

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В. Кабонен<sup>1</sup>✉, А.В. Грязькин<sup>2</sup>, О.И. Гаврилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет», Россия, 1194018, г. Санкт-Петербург, пер. Институтский 5, корпус «У»

alexkabonen@mail.ru

Представлены данные о росте и развитии 23-летних лесных культур, созданных посевом и посадкой саженцев с закрытой корневой системой на территории Республики Карелия. Посредством фотограмметрической обработки данных с беспилотного летательного аппарата (DJI Mavic Mini 2) построен ортофотоплан лесных культур и определено количественное распределение древесных пород. Установлено, что на всех опытных участках сформировались молодняки с преобладанием сосны обыкновенной. Показано, что использование алгоритмов автоматизированного поиска деревьев по плотным облакам точек позволяет детектировать 91 % деревьев из общей массы облака точек и определять их высоты. Основные выявленные характеристики древостоев, определяемые с помощью БПЛА и наземным методом, различались в пределах точности измерений.

**Ключевые слова:** лесные культуры, рост и развитие, беспилотный летательный аппарат

**Ссылка для цитирования:** Кабонен А.В., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Оценка состояния лесных культур с использованием беспилотного летательного аппарата // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 57–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-57-66

Опыт искусственного лесовосстановления в Республике Карелия насчитывает несколько десятков лет. Лесные культуры создавались посевом или посадкой на участках с обработкой и без обработки почвы [1]. Эффективность искусственного лесовосстановления хвойными породами проанализирована в работе [2]. Эффективность лесных культур, созданных сеянцами или саженцами, отражена в работе [3]. Биометрические характеристики лесных культур, созданных брикетированным посадочным материалом, имеют более высокие показатели, чем культуры, созданные открытой корневой системой или посевом [4].

Классический метод оценки успешности лесовосстановления — натурное наземное обследование [5], однако часто не доступно вследствие большой удаленности объектов или плохо развитой инфраструктуры. Такие альтернативные способы, как дешифрирование космических снимков в настоящее время недостаточно проработаны в связи с низким пространственным разрешением и не дают возможности провести объективную оценку лесных культур. В то же время на основании проведенных исследований [6, 7] выявлена высокая точность (84 %) оценки успешности лесовосстановления, проведенной по многолетним рядам мультиспектральных изображений со спутника Landsat с помощью вегетационного индекса NDVI.

Новые открывающиеся возможности обработки данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также использование опыта, полученного при применении материалов аэро- и космической фотосъемки, позволяют вывести на современный качественный уровень аналитическое, измерительное и автоматизированное дешифрирование. При определенных условиях съемки и с учетом последующей статистической обработки данных, полученных с помощью БПЛА, этот метод является весьма информативным для определения лесотаксационных характеристик, оценки состояния насаждений, мониторинга процессов лесовосстановления [8–11].

Применение БПЛА для оценки восстановления лесных площадей позволяет существенным образом снизить трудоемкость процессов перевода земель в покрытые лесом площади и получить важную информацию для объективного состояния лесовосстановления на исследуемых территориях [12–14].

В то же время применение БПЛА имеет свои недостатки по сравнению со спутниковыми данными: зависимость от погодных условий (невозможность их применения при сильном ветре, в дождливую погоду, низкой температуре воздуха) и малое покрытие территории съемки в связи с ограниченностью аккумуляторного ресурса (от нескольких минут до 3–4 ч) [15–17].

В работах [18–20] показано, что при исследовании лесовосстановления на удаленных территориях может быть эффективным сочетание

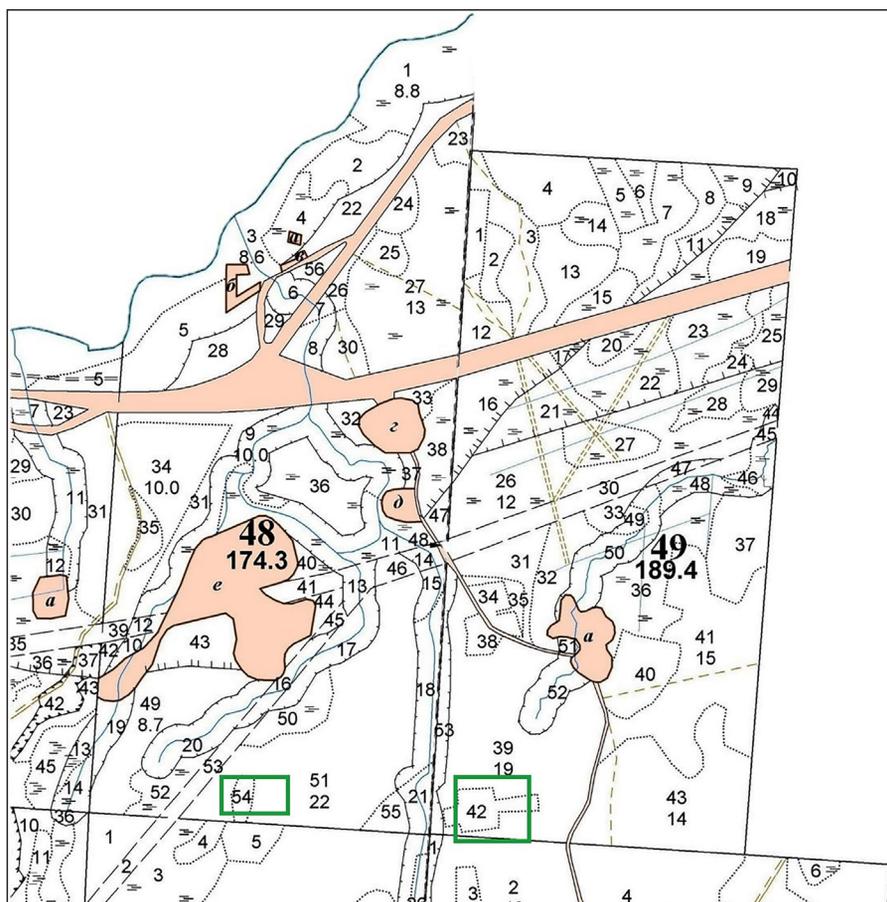


Рис. 1. Местоположение объекта исследования на схеме лесоустройства (зеленым контуром обозначены исследуемые участки)

Fig. 1. Location of the study plot on the forest inventory scheme (green outline indicates the study areas)

комбинированных методов исследований: применение БПЛА и натурное обследование местности. Сопоставление результатов, полученных из материалов детального обследования и фотоснимков высокого пространственного разрешения, позволяет максимально достоверно характеризовать процессы лесовосстановления на исследуемой территории.

### Цель работы

Цель работы — сравнительная оценка состояния экспериментальных лесных культур, созданных посевом и посадкой на участках с обработкой и без обработки почвы, посредством анализа и сопоставления данных, полученных с помощью БПЛА, с результатами натурного обследования.

### Материалы и методы

Объект исследования — участки лесных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданные в кварталах № 48 и 49 Пряжинского центрального лесничества Республики Карелия (рис. 1), с географическими координатами 61°45'15.7"N 33°45'40.8"E. На участках лес-

ных культур распространены песчаные, слабо-подзолистые, грубогумусные на песках почвы бывшего сосняка брусничного, вырубленного в 1991 г. Площадь вырубki 50 га. Спустя 8 лет после вырубki (в 1999 г.) на площади около 6 га были проведены реконструкция молодняка путем удаления лиственных пород с оставлением сосны и обработка почвы покровосдирателем ПДН-1.

На следующий год после проведенных мероприятий (2000) были созданы лесные культуры заложением следующих четырех экспериментальных участков:

- 1) посевом площадками с обработкой почвы;
- 2) рядовой посадкой с обработкой почвы;
- 3) рядовой посадкой без обработки почвы;
- 4) посадкой биогруппами без обработки почвы.

Для лесных культур был выбран однолетний посадочный материал с закрытой корневой системой сосны обыкновенной из лесного питомника. При всех посадках использовалась посадочная труба для семян *Pottiputki*. Густота посадки сосны на 1 га рассчитана следующим образом:

1) посевом площадками с обработкой почвы — 3600 экз./га;

2) рядовой посадкой с обработкой почвы — 3600 экз./га;

3) рядовыми посадками без обработки почвы — 3600 экз./га;

4) посадкой биогруппами без обработки почвы — 2000 экз./га.

Общая площадь обследованных культур составила 2,3 га, из которых 0,8 га были созданы без обработки почвы, а 1,6 га — с обработкой почвы (табл. 1). В настоящий момент площадки заросли лиственными породами (преимущественно березой повислой и рябиной обыкновенной).

При выполнении работ по обследованию культур использовали комбинированный способ сбора материала: метод закладки пробных площадей [5, 21] и аэрофотосъемку с БПЛА с фотограмметрической обработкой данных [22].

Перечет деревьев в молодниках проводили по 2-сантиметровым ступеням толщины. Средний диаметр определяли как средневзвешенную величину. Средняя высота получена с кривой высот, построенной по результатам измерения высоты и диаметра девяти деревьев разного размера, отобранных из преобладающих ступеней толщины. Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова (ЖНП) проводили на круговых учетных площадках по 10 м<sup>2</sup>. Для подроста и подлеска указывали численность, состав и структуру по высоте и категориям состояния. Для ЖНП фиксировали виды, величину встречаемости и проективное покрытие для каждого вида в составе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов.

Для аэрофотосъемки использовали квадрокоптер DJI Mavic Mini 2 со следующими техническими характеристиками: стандартной RGB-камерой FC7303 (разрешение изображений 4000×3000 пк) и спутниковыми системами позиционирования GPS и ГЛОНАСС (точность позиционирования ±1,5 м).

Полет БПЛА проходил на высоте 80 м от уровня взлетной площадки по всему объекту съемки. Исходное разрешение 2,5...3 см на 1 пк в зависимости от локальных высот рельефа. Дрон управлялся пилотом вручную с помощью мобильного приложения DJI Fly без использования полетного задания. Полет проходил по параллельным линиям с перекрытием снимков не менее 70 %.

Полученные данные обрабатывали в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional Version 1.5.4. Алгоритм обработки данных включал в себя реализацию предлагаемого в руководстве пользователя решения.

Подсчет количества деревьев и измерение высот отдельных деревьев по фотограмметрическим

Т а б л и ц а 1

## Характеристики объектов на момент их создания (1999 г.)

Characteristics of the objects at the time of their establishment (1999)

Номер опытного участка	Площадь, га	Способ создания культур	Схема посадки (посева)	Количество посадочных (посевных) мест, шт./га
1	0,5	Посев с обработкой почвы	Площадками 0,25 м <sup>2</sup> — 0,9×3 м	3600
2	0,9	Посадка с обработкой почвы	Рядами — 0,9×3 м	3600
3	0,5	Посадка без обработки почвы	То же	3600
4	0,3	То же	Биогруппами по 5 шт. 1,5×1,5 м	2000

облакам точек для каждого опытного участка выполняли с помощью среды статистического программирования R version 4.1.2 с использованием функций специализированного пакета lidR version 3.2.3.

Для верификации полученные результаты сравнивали с ручными точкованием по ортофотоплану местности. Для всех корректно детектированных деревьев сравнивали их высоту, полученную в результате автоматических вычислений, с высотой, измеренной при натурном обследовании.

Качество работы алгоритма было определено на основе общепринятых оценок [23–25]. Для этого вычисляли значения полноты обнаружения  $p$ , качества обнаружения  $r$  и средневзвешенной оценки качества  $F$  по формулам:

$$r = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (1)$$

$$p = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

$$F = \frac{2rp}{r + p}, \quad (3)$$

где  $TP$  — число корректно детектированных алгоритмом деревьев;

$FP$  — число ложных срабатываний;

$FN$  — число пропущенных деревьев;

$p$  — полнота обнаружения;

$r$  — качество обнаружения;

$F$  — средневзвешенная оценка качества.

## Результаты и обсуждение

Натурные обследования показали, что через 23 года после создания лесных культур на всех опытных участках сформировались молодняки с преобладанием сосны обыкновенной (табл. 2). Установлено, что доля лесных культур на участках по запасу древесины составляет 38...44 % общего запаса, следовательно, на участках лесных культур преобладают древесные породы естественного происхождения.

На участке лесных культур, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой, отмечен следующий состав древостоя — 44Слк53Сев2Б2Олс+И и общий запас — 189 м<sup>3</sup>/га. Состав древостоя на участке с посевом сосны — 38Слк56Сев4Е2Б+Ос, общий запас — 128 м<sup>3</sup>/га. Результаты полевых обследований свидетельствуют о том, что запас лесных культур сосны, созданных из брикетированных семян, значительно выше по сравнению с культурами, созданными посевом, соответственно 83 и 48 м<sup>3</sup>/га.

Из табл. 2 следует, что создание лесных культур посадкой (опытные участки № 2–4) предпочтительнее посева (№ 1), так как по составу молодняков и запасу лесных культур показатели были более высокие. При этом отпад сосны на участке, созданном посевом, больше, чем на участках лесных культур, созданных посадкой.

На участках посадки лесных культур с обработкой почвы определена существенно большая численность культур сосны — до 50–60 ед. в составе, в то время как на участках без обработки почвы состав молодняка представлен культурами сосны в количестве не более 30...40 %. При этом посадка биогруппами показала минимальное количество

культур в составе. Следует отметить, что предварительное естественное возобновление, произошедшее на участках культур, не смогло бы обеспечить здесь преобладание хвойных пород, а рядовая посадка дает максимальный запас культур сосны (см. табл. 2).

Под пологом лесных культур на всех опытных участках появляется подрост лесообразующих пород общей численностью 620...790 шт./га (табл. 3). На участках без обработки почвы (№ 3, 4) преобладает ель, а на участках с обработкой почвы (№ 1, 2) — лиственные породы. Предположительно, это может быть связано с характеристиками почвенно-грунтовых условий.

Подлесок участвует в формировании лесных фитоценозов на всех участках. Общая численность подлеска составляет от 220 до 410 шт./га. В составе подлеска преобладает рябина (табл. 4).

Видовой состав живого напочвенного покрова на всех площадках представлен небольшим количеством видов (14 шт.), что, вероятно, связано со сравнительно небогатыми почвами. Мохово-лишайниковый ярус представлен зелеными мхами, кукушкиным льном и сфагнумами (табл. 5). В составе травяно-кустарничкового яруса на всех участках преобладает брусника. Мощность органических горизонтов суммарно составляет не более 3...5 см. Подстилка представлена слабо разложившимся опадом. Гумусовый горизонт на всех участках маломощный, частично вымыт в нижележащий горизонт — охристый песок. 30–40-сантиметровый слой охристого песка сменяется песчаными отложениями светло-серого цвета. На участках с культурами без обработки почвы наблюдаются следы оглеения, здесь более мощный слой мертвого напочвенного покрова — до 5...8 см, однако гумусовый горизонт также не более 3...5 см.

Т а б л и ц а 2

**Характеристики молодняков на участках лесных культур по данным натурального обследования**  
**Characteristics of young trees in the forestry crop plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средний диаметр ствола, см	8,90	12,9	9,2	8,8
Средняя высота, м	7,9	10,2	8,1	8,0
Состав по численности, %	61Слк9Сев 13Б16Е1О	51Слк17Сев 10Б6Е13Олс3Ив	41Слк12Сев 25Б16Е3Олс3Ив1Ос	31Слк14Сев 28Б13Е8Олс6Ив
Численность, экз./га	3902	2413	4322	5241
Состав по запасу, %	38Слк56Сев 4Е2Б+Ос	44Слк53Сев 2Б2Олс+И	42Слк23Сев 28Б6Олс1Ос+И	35Слк31Сев 28Б6Олс+И
Общий запас, м <sup>3</sup> /га	128	189	138	128
Запас лесных культур сосны, м <sup>3</sup> /га	48	83	76	45
Отпад лесных культур сосны, экз./га	488	448	320	380
Отпад лесных культур сосны, м <sup>3</sup> /га	3,1	3,0	1,9	2,6

Т а б л и ц а 3

**Характеристики подроста на участках по данным натурных обследований****Characteristics of undergrowth on the plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средняя высота, м	0,72	0,64	0,78	0,85
Состав по численности, %	65Б22Ос12Е	59Ос17Б13Е11Олс	56Е35Ос9Олс	41Е42Ос21Олс
Общая численность, экз./га	620	680	790	750

Т а б л и ц а 4

**Численность и состав подлеска на опытных участках по данным натурных обследований****Numbers and composition of undergrowth in the trial plots based on field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Средняя высота, м	0,78	0,71	0,64	0,59
Состав по численности, %	82Ряб18Ива	80Р20Ива	71Р29Ива	75Р25Ива
Общая численность, экз./га	386	410	220	284

Т а б л и ц а 5

**Встречаемость и проективное покрытие живого напочвенного покрова****на опытных участках по данным натурных обследований****Occurrence and projective cover of living ground cover on trial plots according to field survey data**

Характеристики	С обработкой почвы		Без обработки почвы	
	Посев	Посадка	Посадка рядовая	Посадка биогруппами
Количество видов в травостое, шт.	7	7	6	6
Количество видов в мохово-лишайниковом ярусе, шт.	5	5	9	8
Состав травостоя, %	78 — брусника, 17 — вереск, 3 — луговик, 2 — остальные виды	82 — брусника, 11 — вейник, 3 — вереск, 3 — луговик, 1 — остальные виды	67 — брусника, 12 — черника, 10 — луговик, 4 — вейник, 7 — остальные виды	58 — брусника, 20 — черника, 8 — луговик, 5 — вейник, 9 — остальные виды
Состав мхов, %	100 — зеленые мхи	100 — зеленые мхи	77 — зеленые мхи, 14 — кукушкин лен, 9 — сфанумы	74 — зеленые мхи, 17 — кукушкин лен, 10 — сфагнумы
Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, %	83	89	91	93
Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса, %	32	23	48	45

В результате проведения аэрофотосъемки было получено 651 изображение. Фотограмметрическая обработка позволила получить 336 тыс. связующих точек со средней невязкой (ошибкой репроецирования) 2,1 пк. При фотограмметрической обработке был получен ортофотоплан с пространственным разрешением 2 см/пк (рис. 2) и плотное облако точек в количестве 55 млн шт. со средней плотностью 3,6 тыс. шт./м<sup>2</sup>.

Для анализа распределения породного и количественного состава растительности по территории

выполнено маркирование деревьев на ортофотопланах по опытным участкам, в результате которого определено количественное распределение древесных пород в разном соотношении на всех опытных участках: от 60 (участки без обработки почвы) до 80 % (участки с обработкой почвы) — сосна, 10...22 % — береза. Эти данные согласуются с результатами натурного обследования.

Для анализа трехмерных облаков точек использовались точки, относящиеся только к отдельным опытным участкам (табл. 6).



Рис. 2. Ортофотоплан местности: 1–4 — участки лесных культур

Fig. 2. Image plan of the area: 1–4 — forest crop plots



Рис. 3. Обнаруженные верхушки деревьев (отмечены точками) на фрагменте ортофотоплана местности (а) и карты высот (б)

Fig. 3. Detected tree tops (marked with dots) on the image map fragment (a) and height map (b)

В результате запуска алгоритма автоматического поиска деревьев по облакам точек с помощью пакета lidR удалось обнаружить (рис. 3) большую часть деревьев на всех участках и определить их высоты (см. табл. 6).

В результате ручного детектирования по ортофотоплану местности на участке № 1 учтено 250 деревьев, № 2 — 353 дерева, № 3 — 277 деревьев, на участке № 4 — 130 деревьев, а автоматическое детектирование выявило 215, 313, 240 и 118 деревьев соответственно, что в целом составляет около 91 % общего числа деревьев. При этом большинство деревьев (85 %), найденных алгоритмом, были определены корректно. Число

ложных срабатываний и число пропущенных деревьев показали достаточно низкие значения, а средневзвешенная оценка качества составила 0,89, что указывает на высокую эффективность поиска деревьев.

При сравнении высоты отдельных деревьев на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту для основных лесообразующих пород (сосны, березы). Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной не превышала 13 м, а средние значения варьировали от 10,5 до 12,5 м.

Определить высоту подростка для мелкой и средней групп (от 0,5 до 1,5 м) не представлялось

Т а б л и ц а 6

**Технические характеристики плотных облаков точек и результаты автоматического детектирования деревьев на участках № 1–4 (см. табл. 1)**

**Technical characteristics of dense point clouds and results of automatic tree detection in plots 1-4 (see Table 1)**

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Число точек в плотном облаке, млн	3,3	5,4	2,8	2,2
Плотность облака точек, тыс. шт./м <sup>2</sup>	3,87	4,13	4,08	3,72
Число точек класса «земная поверхность», млн	0,4	0,7	0,3	0,2
Число точек класса «деревья», млн	2,9	4,7	2,3	1,9
Число найденных деревьев, шт.	215	313	240	118
Число деревьев на ортофотоплане, шт.	250	353	277	130
Средняя высота деревьев, м	10,1	12,6	11,3	10,9

возможным в связи со сложностью их идентифицирования и разделения трехмерных облаков точек, относящихся к разным классам («земная поверхность» и «низкая растительность»). Для решения этой проблемы, вероятно, можно использовать мультиспектральную съемку с ближним инфракрасным (NIR) и/или дальним инфракрасным (RedEdge) каналами спектра [6, 26].

В то же время результаты автоматического поиска отдельных деревьев (шт.) по трехмерным облакам точек показали, что выбранный алгоритм детектирования деревьев на практике дал хорошие результаты, что говорит о возможности его применения для подсчета и оценки высоты деревьев лесных культур. Эти результаты подтверждают уже опубликованные данные, полученные учеными на других объектах [27–30].

## Выводы

Проведенные исследования с помощью БПЛА и натурными обследованиями показали, что эти методы могут быть достаточно успешно использованы для оценки состояния лесных культур. При анализе ортофотоплана местности определяется количественное распределение древесных пород, при этом эти данные согласуются с результатами натурного обследования. По облакам точек возможно автоматизированное обнаружение большей части деревьев и определение их высот. Полученные результаты могут быть использованы для оценки состояния лесных культур на других объектах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).*

## Список литературы

- [1] Соколов А.И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2006. 215 с.
- [2] Соколов А.И. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурными методами. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2016. 178 с.
- [3] Гаврилова О.И., Пак К.А., Морозова И.В., Юрьева А.Л. Формирование искусственных сосновых древостоев в условиях карельской таежной зоны // ИзВуз Лесной журнал, 2017. № 4. С. 23–33.
- [4] Морозова И.В., Гаврилова О.И. Закономерности роста лесных культур сосны на начальных стадиях роста (1–5 год) на вырубках южной Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки, 2011. № 2 (115). С. 75–78.
- [5] Фетисова А.А., Грязькин А.В., Ковалев Н.В., Гуталь М. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рощинского лесничества // ИзВуз Лесной журнал, 2013. № 6 (336). С. 9–18.
- [6] Белова Е.И., Ершов Д.В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение, 2015. № 5. С. 339–345.
- [7] Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36.
- [8] Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник ПГТУ. Серия Лес. Экология. Природопользование, 2016. № 4 (32). С. 34–46.
- [9] Вогель Д.К., Юферев В.Г. Оценка лесных насаждений Волго-Ахтубинской поймы на основе фотограмметрической обработки данных цифровой аэросъемки // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса, 2018. № 3 (51). С. 203–209.
- [10] Галецкая Г.А., Вьюнов М.В., Железова С.В., Завалишин С.И. Возможности обработки и анализа данных сверхлегкого БПЛА SenseFly eBee в лесном хозяйстве // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2015. № 4. С. 11–18.
- [11] Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // ИзВуз Лесной журнал, 2021. № 4. С. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22.
- [12] Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion // Forests, 2018, v. 9(3), art. 119. DOI: 10.3390/f9030119
- [13] Алексеев А.С., Данилов Ю.И., Никифоров А.А., Гузюк М.Е., Киреев Д.М. Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2020. № 2. С. 46–48.

- [14] Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14(5). С. 87–99.
- [15] Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery // *Forests*, 2013, v. 4, pp. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922
- [16] Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System // *Rangeland Ecology and Management*, 2020, v. 73(5), pp. 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010
- [17] Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbod T.R.H., Pelletier G. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned Aerial Systems (UAS) // *Remote Sensing*, 2019, v. 11(7), art. 739. DOI: 10.3390/rs11070739
- [18] Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // *Remote Sensing*, 2012, v. 4, pp. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671
- [19] Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // *Biological Conservation*, 2015, v. 186, pp. 287–295.
- [20] Медведев А.А., Тельнова Н.О., Кудиков А.В. Картографирование процесса зарастания залежных земель по разновременным высокодетальным данным с космических и беспилотных летательных аппаратов // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*, 2019. № 10 (26). С. 50–55.
- [21] Беляева Н.В., Грязькин А.В., Калинин П.М. Точность учетных работ при оценке естественного лесовозобновления // *Вестник Саратовского госагроуниверситета имени Н.И. Вавилова*, 2012. № 8. С. 7–12.
- [22] Кабонен А.В., Иванова Н.В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного LiDAR и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, 2023. Т. 8(1). С. 64–83.
- [23] Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation // *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2005, pp. 345–359.
- [24] Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation // *Proceedings of the Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2008, pp. 1015–1021.
- [25] Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, v. 78(1), pp. 75–84.
- [26] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images // *Drones*, 2021, v. 5(3), art. 77.
- [27] Zhang J., Hud J., Liane J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring // *Biological Conservation*, 2016, v. 198, pp. 60–69.
- [28] Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., JeanFrançois B. Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. package «lidR». Version 2.2.2. 2020. URL: <https://www.scinapse.io/papers/3122270431> (дата обращения 12.06.2023).
- [29] Picos J, Bastos G, Míguez D, Alonso L, Armosto J. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR // *Remote Sensing*, 2020, v. 12 (5). DOI: 10.3390/rs12050885.
- [30] Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs // *Remote Sensing*, 2020, v. 12(13). DOI: 10.3390/rs12132115.
- [31] Zhou, J., Proisy, C.; Descombes, X.; Le Maire, G.; Nouvelon, Y.; Stape, J.-L.; Viennois, G.; Zerubia, J.; Coutron, P. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // *For. Ecol. Manag.*, 2013, v. 301, p. 129–141.
- [32] Mohan, M., Silva, A.C.; Klauberg, C.; Jat, P.; Catts, G., Cardil, A., Hudak, T.A.; Dia, M. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived Canopy Height Model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*, 2017, v. 8, p. 340.
- [33] Wallace, L., Lucieer, A.; Malenovský, Z., Turner, D.; Vopěnka, P. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds // *Forests* 2016, v. 7, p. 62.
- [34] Cosenza, D.N., Soares, V.P., Leite, H.G., Gleriani, J.M. Airborne laser scanning applied to eucalyptus stand inventory at individual tree level // *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 2018, v. 53, p. 1373–1382.
- [35] Shinzato, E.T., Shimabukuro, Y.E., Coops, N.C., Tompalski, P., Gasparoto, E.A. Integrating area-based and individual tree detection approaches for estimating tree volume in plantation inventory using aerial image and airborne laser scanning data // *iFor. Biogeosci. For.*, 2017, v. 10, p. 296–302.

## Сведения об авторах

**Кабонен Алексей Валерьевич** <sup>✉</sup> — директор Центра цифрового мониторинга северных и арктических экосистем, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», alexkabonen@mail.ru

**Грязькин Анатолий Васильевич** — д-р биол. наук, профессор кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет»

**Гаврилова Ольга Ивановна** — д-р с.-х. наук, профессор кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Поступила в редакцию 04.09.2023.

Одобрено после рецензирования 13.02.2024.

Принята к публикации 24.04.2024.

# FORESTRY CROPS ASSESSMENT BY USING UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.V. Kabonen<sup>1</sup>✉, A.V. Gryazkin<sup>2</sup>, O.I. Gavrilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185640, Petrozavodsk, Karelia, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forest Engineering University, 1194018, St. Petersburg, Russia

alexkabonen@mail.ru

Data on the growth and development of 23-year-old forest crops created by sowing and planting seedlings with a root-balled tree system on the territory of the Karelia Republic are presented. Using photogrammetric processing of data from an unmanned aerial vehicle (DJI Mavic Mini 2), an image plan of forestry crops was constructed and the quantitative distribution of tree species was determined. It was established that in all experimental areas, young stands with a predominance of Scots pine had been formed. It is shown that the use of algorithms for automated search for trees in dense point clouds makes it possible to detect 91 % of trees from the total mass of the point cloud and determine their height. The main identified characteristics of forest stands, determined using UAVs and the ground technique, differed within the limits of measurement accuracy.

**Keywords:** forestry crops, growth and development, unmanned aerial vehicle

**Suggested citation:** Kabonen A.V., Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. *Otsenka sostoyaniya lesnykh kul'tur s ispol'zovaniem bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Forestry crops assessment by using unmanned aerial vehicle]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 57–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-57-66

## References

- [1] Sokolov A.I. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh Severo-Zapada Rossii* [Reforestation in the clearings of the North-West of Russia]. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2006, 215 p.
- [2] Sokolov A.I. *Povyshenie resursnogo potentsiala taezhnykh lesov lesokul'turnymi metodami* [Increasing the resource potential of taiga forests by silvicultural methods]. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, 178 p.
- [3] Gavrilova O.I., Pak K.A., Morozova I.V., Yurieva A.L. *Formirovaniye iskusstvennykh sosnovykh drevostoev v usloviyakh karel'skoy taezhnoy zony* [Formation of artificial pine stands in the conditions of the Karelian taiga zone]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, no. 4, pp. 23–33.
- [4] Morozova I.V., Gavrilova O.I. *Zakonomernosti rosta lesnykh kul'tur sosny na nachal'nykh stadiyakh rosta (1–5 god) na vyrubkakh yuzhnoy Karelii* [Patterns of growth of pine forest plantations at the initial stages of growth (1–5 years) in the clearings of southern Karelia]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Natural and technical sciences*, 2011, no. 2 (115), pp. 75–78.
- [5] Fetisova A.A., Gryaz'kin A.V., Kovalev N.V., Gutal' M. *Otsenka estestvennogo vozobnovleniya khvoynnykh porod na sploshnykh vyrubkakh v usloviyakh Roshchinskogo lesnichestva* [Evaluation of natural regeneration of conifers in clear cuts in the conditions of Roshchinsky forestry]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2013, no. 6 (336), pp. 9–18.
- [6] Belova E.I., Ershov D.V. *Opyt otsenki estestvennogo lesovosstanovleniya na sploshnykh vyrubkakh po vremennym ryadam Landsat* [Experience in assessing natural reforestation in clear cuts according to Landsat time series]. *Lesovedenie*, 2015, no. 5, pp. 339–345.
- [7] Akovetsky V.G., Afanasyev A.V. *Metody i tekhnologii interpretatsii aerokosmicheskikh monitoringovykh nablyudenykh lesnoy rastitel'nosti* [Methods and technologies for forest vegetation aerospace monitoring interpretation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 29–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-29-36
- [8] Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. *Opyt primeneniya kvadrokoptera dlya monitoringa vozobnovleniya lesa* [Experience of using a quadcopter to monitor forest renewal]. *Vestnik PGTU. Ser. Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik of Perm State Technical University. Ser. Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 4 (32), pp. 34–46
- [9] Vogel' D.K., Yuferev V.G. *Otsenka lesnykh nasazhdeniy Volgo-Akhtubinskoy poymy na osnove fotogrammetricheskoy obrabotki dannykh tsifrovoy aeros'emki* [Evaluation of forest plantations of the Volga-Akhtuba floodplain based on photogrammetric processing of digital aerial survey data]. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrarnogo univ. kompleksa* [News of the Nizhnevolsky Agrarian University Complex], 2018, no. 3 (51), pp. 203–209.
- [10] Galetskaya G.A., V'yunov M.V., Zhelezova S.V., Zavalishin S.I. *Vozmozhnosti obrabotki i analiza dannykh sverkhlegkogo BPLA SenseFly eBee v lesnom khozyaystve* [Possibilities of data processing and analysis of ultralight UAV SenseFly eBee in forestry]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, no. 4, pp. 11–18.
- [11] Nizametdinov N.F., Moiseev P.A., Vorob'ev I.B. *Lazernoe skanirovaniye i aerofotos'emka s BPLA v issledovanii struktury lesotundrovnykh drevostoev Khibin* [Laser scanning and aerial photography from UAVs in the study of the structure of forest-tundra stands of the Khibiny]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2021, no. 4, pp. 9–22. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22
- [12] Alonzo M., Andersen H.E., Morton D.C., Cook B.D. *Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion*. *Forests*, 2018, v. 9(3), art. 119. DOI: 10.3390/f9030119
- [13] Alekseev A.S., Danilov Yu.I., Nikiforov A.A., Guzyuk M.E., Kireev D.M. *Opyt primeneniya bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya inventarizatsii i otsenki opytnykh lesnykh kul'tur Lisingoy chasti uchebno-opytного lesnichestva Leningradskoy oblasti* [Experience in using an unmanned aerial vehicle for inventory and assessment of experimental forest crops of the Lisingy part of the educational and experimental forestry of the Leningrad region]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry], 2020, no. 2, pp. 46–48.
- [14] Aleshko R.A., Alekseeva A.A., Shoshina K.V., Bogdanov A.P., Gur'ev A.T. *Razrabotka metodiki aktualizatsii informatsii o lesnom uchastke s ispol'zovaniem snimkov so sputnikov i malyykh BPLA* [Development of a methodology for updating information about a forest area using satellite images and small UAVs]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, t. 14(5), pp. 87–99.
- [15] Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. *A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small Unmanned Aerial System imagery*. *Forests*, 2013, v. 4, pp. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922

- [16] Jackson M., Portillo-Quintero C., Cox R., Ritchie G., Johnson M., Humagain K., Subedi M. Season, classifier, and spatial resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using an Unmanned Aerial System. *Rangeland Ecology and Management*, 2020, v. 73(5), pp. 658–672. DOI: 10.1016/j.rama.2020.06.010
- [17] Nuijten R.J.G., Coops N.C., Goodbod T.R.H., Pelletier G. Examining the Multi-Seasonal Consistency of Individual Tree Segmentation on Deciduous Stands Using Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Unmanned Aerial Systems (UAS). *Remote Sensing*, 2019, v. 11(7), art. 739. DOI: 10.3390/rs11070739
- [18] Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 2012, v. 4, pp. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671
- [19] Zahawi R.A., Dandois J.P., Holl K.D., Nadwodny D., Reid J.L., Ellis E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*, 2015, v. 186, pp. 287–295.
- [20] Medvedev A.A., Tel'nova N.O., Kudikov A.V. *Kartografirovaniye protsessa zarastaniya zaleznykh zemel' po raznovremennym vysokodetal'nym dannym s kosmicheskikh i bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Mapping the process of overgrowing of fallow lands using multi-time, highly detailed data from space and unmanned aerial vehicles]. *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya* [Earth from Space: the most effective solutions], 2019, no. 10 (26), pp. 50–55.
- [21] Belyaeva N.V., Gryaz'kin A.V., Kalinskiy P.M. *Tochnost' uchetykh rabot pri otsenke estestvennogo lesovozobnovleniya* [Accuracy of accounting work in assessing natural reforestation]. *Vestnik Saratovskogo gos. agr. un-ta im. N.I. Vavilova* [Bulletin of the Saratov State Agr. University named after N.I. Vavilova], 2012, no. 8, pp. 7–12.
- [22] Kabonen A.V., Ivanova N.V. *Otsenka biometricheskikh kharakteristik derev'ev po dannym nazemnogo LiDAR i raznosezonnay aerofotos'emki v iskusstvennykh nasazhdeniyakh* [Assessing the biometric characteristics of trees based on ground-based LiDAR data and multi-seasonal aerial photography in artificial plantings]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka* [Nature Conservation Research. Reserve Science], 2023, t. 8(1), pp. 64–83.
- [23] Goutte C., Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation. *Proceedings of the European Conference on Information Retrieval*. Berlin. Heidelberg: Springer, 2005, pp. 345–359.
- [24] Sokolova M., Japkowicz N., Szpakowicz S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. *Proceedings of the Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Berlin. Heidelberg: Springer2008, pp. 1015–1021.
- [25] Li W., Guo Q., Jakubowski M.K., Kelly M. A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2012, v. 78(1), pp. 75–84.
- [26] Safonova A., Hamad Y., Dmitriev E., Georgiev G., Trenkin V., Georgieva M., Dimitrov S., Iliev M. Individual tree crown delineation for the species classification and assessment of vital status of forest stands from UAV images. *Drones*, 2021, v. 5(3), art. 77.
- [27] Zhang J., Hud J., Liane J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 2016, v. 198, pp. 60–69.
- [28] Roussel J.R., Auty D., De Boissieu F., Meador A.S., JeanFrançois B. Airborne LiDAR data manipulation and visualization for forestry applications. package «lidR». Version 2.2.2. 2020. Available at: <https://www.scinapse.io/papers/3122270431> (accessed 12.06.2023).
- [29] Picos J, Bastos G, Míguez D, Alonso L, Armesto J. Individual Tree Detection in a Eucalyptus Plantation Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sensing*, 2020, v. 12 (5). DOI: 10.3390/rs12050885
- [30] Bennett G., Hardy A., Bunting P., Morgan P., Fricker A. A Transferable and Effective Method for Monitoring Continuous Cover Forestry at the Individual Tree Level Using UAVs. *Remote Sensing*, 2020, v. 12(13), art. 2115. DOI: 10.3390/rs12132115
- [31] Zhou, J., Proisy, C.; Descombes, X.; Le Maire, G.; Nouvellon, Y.; Stape, J.-L.; Viennois, G.; Zerubia, J.; Couteron, P. Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images // *For. Ecol. Manag.* 2013, v. 301, p. 129–141.
- [32] Mohan, M., Silva, A.C.; Klauber, C.; Jat, P.; Catts, G., Cardil, A., Hudak, T.A.; Dia, M. Individual tree detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived Canopy Height Model in an open canopy mixed conifer forest // *Forests*, 2017, v. 8, p. 340.
- [33] Wallace, L., Lucieer, A.; Malenovsky, Z., Turner, D.; Vopěnka, P. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds // *Forests* 2016, v. 7, p. 62.
- [34] Cosenza, D.N., Soares, V.P., Leite, H.G., Gleriani, J.M. Airborne laser scanning applied to eucalyptus stand inventory at individual tree level // *Pesqui. Agropecu. Bras.* 2018, v. 53, p. 1373–1382.
- [35] Shinzato, E.T., Shimabukuro, Y.E., Coops, N.C., Tompalski, P., Gasparoto, E.A. Integrating area-based and individual tree detection approaches for estimating tree volume in plantation inventory using aerial image and airborne laser scanning data // *iFor. Biogeosci. For.*, 2017, v. 10, p. 296–302.

*The work was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2023-128).*

## Authors' information

**Kabonen Aleksey Valer'evich**✉ — Director of the Center for Digital Monitoring of Northern and Arctic Ecosystems of Petrozavodsk State University, alexkabonen@mail.ru

**Gryaz'kin Anatoliy Vasil'evich** — Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department of Forestry, St. Petersburg Forestry University

**Gavrilova Olga Ivanovna** — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Technology and Organization of the Forestry Complex, Petrozavodsk State University

Received 04.09.2023.

Approved after review 13.02.2024.

Accepted for publication 24.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest