

Н.Н. СЕВОСТЬЯНОВА, И.В. ЛЕБЕДЕВ, В.В. ЛЕБЕДЕВА, И.В. ВАТАМАНЮК
**ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ФОТОАКТИВАЦИИ ПОСЕВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ
ПОСРЕДСТВОМ БПЛА С ЦЕЛЬЮ СТИМУЛЯЦИИ РОСТА
КУЛЬТУР**

Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БПЛА с целью стимуляции роста культур.

Аннотация. Фотоактивация растений посредством лазерной обработки является перспективным направлением развития современного аграрного производства. Обработка растений излучением с заданными характеристиками стимулирует развитие растений, формирование генеративных признаков и рост урожайности. Для автоматизации процесса фотоактивации больших посевных площадей предложен подход, основанный на использовании специализированной лазерной установки, монтируемой на беспилотный летательный аппарат (БПЛА). При помощи БПЛА можно производить лазерную обработку сельскохозяйственных полей большой площади при минимальных затратах временных и человеческих ресурсов. В работе предложен алгоритм расчета траектории для равномерного покрытия прямоугольного участка земли лазерным излучением с заданными характеристиками. Приводится методика расчета требуемой мощности лазерной установки в зависимости от высоты и времени полета БПЛА. Преимуществом разработанного подхода является его универсальность, поскольку данный подход учитывает характеристики лазерного устройства и может применяться с устройствами различного типа. В зависимости от параметров лазера алгоритм строит такую траекторию для БПЛА, чтобы облучение всходов растений было равномерным на протяжении всего процесса обработки. При проведении полевых экспериментов при движении БПЛА вдоль рассчитанной траектории со скоростью 0,3 м/с время обработки поля длиной в 200 м и шириной 1 м составило 9 мин. Результаты полевых экспериментов показывают, что лазерное облучение для большей части изучаемых культур увеличило урожайность и высоту травостоя (у злаковых – для четырех из шести культур, у бобовых – для четырех из пяти изучаемых культур). Предлагаемый алгоритм построения пути для равномерного лазерного облучения участка учитывает площадь проекции лазерного излучения для обеспечения требуемых характеристик обработки поля.

Ключевые слова: лазерная установка, стимуляция роста растений, БПЛА, сельское хозяйство, планирование пути, планирование покрывающей траектории, маломощный лазер, лазерная фотоактивация.

1. Введение. Разработка и использование новых методов эффективного стимулирования развития растений является актуальной задачей современного растениеводства [1]. Многие исследователи изучают воздействие электромагнитного поля и УФ-излучения на семена культурных растений [2, 3]. Облучение семян растений часто приводит к росту посевных качеств, таких как всхожесть и энергия прорастания, а также к улучшению морфологических параметров растения, что ведет к росту урожайности [4].

Среди энергетических воздействий высокой экономичностью, технологичностью и экологической безопасностью обладает лазерное излучение [5]. Лазерная фотоактивация (обработка) сельскохозяйственных культур – это непрерывное или импульсивное облучение семян или их всходов лучом лазера. Основной целью такой обработки является повышение урожайности, снижение заболеваемости растений различными инфекциями, развитие мощной корневой системы у с/х культур. В результате лазерной обработки увеличивается всхожесть семян, активируется синтез хлорофилла, за счёт чего растения быстрее развиваются и дают высокий урожай.

Преимущества лазерной обработки: кратковременность воздействия, отсутствие отрицательных эффектов в широком диапазоне режимов лазерной обработки семян; стабильное повышение урожайности с/х культур в различных почвенно-климатических условиях; повышение качества с/х продукции (увеличение количества белков, углеводов и витаминов); возможность снижения нормы высева на 10-30% за счет повышения полевой всхожести семян и усиления ростовых процессов; повышение устойчивости растений к поражению различными заболеваниями; безвредность обработки для растений [6].

На практике часто применяется именно лазерная фотоактивация семян. Например, способ, описанный в работе [7], может быть использован для предпосевной обработки семян. Способ включает операцию предпосевого облучения семян в условиях зернохранилищ лазерным лучом, сканирующим одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В работах [8-10] описано влияние низкоинтенсивного лазерного излучения с длиной волны 635, 650 и 890 нм (в работе [8] – 890 нм, в [9] – 650 нм, в [10] – 635 нм) на семена с/х культур, с целью активации всхожести. По результатам экспериментов после лазерного облучения всхожесть опытных семян болгарского перца и огурца [8], семейства тыквенных [9] и бобовых [10] оказалась почти на 21% выше, чем всхожесть контрольных групп, которые не подвергались облучению.

В последние годы также стала популярна лазерная обработка всходов. Практические результаты, полученные таким методом обработки ростков, выглядят многообещающе [11]. Так, например, авторы работ [12-13] предлагают автоматическую систему обработки растений с использованием солнечной энергии в качестве источника питания. В качестве источников излучения в системе используется набор мало-мощных лазеров разного спектра. Луч каждого лазера разворачивается в линию с помощью элемента развертки, получаемая лазерная линия попадает на зеркало. Отражение лазерной линии попадает на растения.

Движение зеркала вокруг одной оси вызывает движение лазерной линии по растениям. Поворот зеркала осуществляется с помощью сервопривода, который позволяет точно управлять параметрами движения. Включение нужного лазера и управление сервоприводом осуществляется через блок управления. Однако такой способ лазерной обработки затруднительно использовать для облучения больших площадей открытого грунта.

Для лазерной обработки обширных посевных площадей применяются различные способы, суть которых заключается в использовании одного подвижного источника излучения, последовательно обрабатывающего небольшие участки поля. В качестве такого передвигающегося источника излучения может быть использован беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Данные аппараты все чаще используются в задачах роботизации сельского хозяйства, например, для мониторинга обширных территорий, точечного внесения удобрений, сбора урожая и др. [14, 15].

Стоит обратить внимание на работу [16], в которой представлен способ лазерной обработки растений посредством БПЛА с интегрированным подвесом блока лазерной кадровой развертки. В блоке формируется сканирующая кадровая развертка лазерного излучения в виде квадратной проекции лазерного излучения. Формируемый оптомеханическим блоком лазерной кадровой развертки кадр с размером 350×350 м, при высоте полета БПЛА 10 м, позволяет обработать площадь 12 га за 30 с. Алгоритм обработки, предлагаемый в [16], выглядит следующим образом. На основании данных о местонахождении и конфигурации поля оператор с клавиатуры блока управления заносит в память БПЛА параметры полета: скорость полета, высоту и координаты точек взлета и посадки, которые лежат в пределах облучаемого участка. В память БПЛА также вводятся координаты привязки к местности для улучшенного позиционирования БПЛА и устанавливается размер окна излучения блока кадровой развертки под заданную площадь обработки. После входа в рабочую точку и набора нужной высоты БПЛА зависает в воздухе и в течение 30 секунд выполняет лазерную обработку. Выполнив обработку, система управления отключает лазер блока кадровой развертки и возвращает БПЛА в точку взлета. Недостатком предложенного способа является его достаточно узкая область применения из-за использования специфического оборудования. Угол веерного пучка лазерной установки составляет 174° и его невозможно изменить. Другими словами, решение в [16] предполагает использование лазерного модуля с фиксированными характеристиками.

Целью данной работы является решение задачи управления БпЛА для обеспечения лазерной обработки с заданными характеристиками прямоугольного участка с/х поля заданной площади. Стартовая и конечная координаты БпЛА совпадают и лежат за пределами области покрытия. Предполагается, что на обрабатываемом участке отсутствуют какие-либо препятствия.

Для достижения указанной цели работы необходима разработка алгоритма автоматизированного движения БпЛА, а также обеспечивающего равномерное облучение лазером заданной территории с сохранением требуемой мощности и других параметров излучения, обеспечивающих эффективный рост растений.

Работа структурирована следующим образом: раздел 1 содержит обзор и анализ современных подходов к планированию траектории для равномерного покрытия облучаемой области; раздел 2 содержит описание подхода к решению задачи покрытия проекцией лазерного луча с заданными характеристиками обширных прямоугольных областей без препятствий; в разделе 3 и 4 представлены результаты теоретических и практических экспериментов соответственно; в заключении представлены преимущества и недостатки предлагаемой схемы лазерной обработки с/х культур.

2. Подходы к планированию траектории для покрытия облучаемой области. Задача управления БпЛА, которую необходимо решить для обеспечения равномерного лазерного облучения ростков, сводится к задаче планирования маршрута равномерного покрытия обрабатываемой области (Coverage Path Planning task, CPP). Задача планирования пути покрытия классифицируется как подзадача планирования движения в робототехнике, где необходимо построить траекторию для робота, чтобы исследовать заданную область [17]. Воспользуемся классификацией существующих подходов к планированию траектории БпЛА для покрытия изучаемой области в соответствии с используемой техникой клеточной декомпозиции [17]. Согласно этой классификации, существуют подходы без декомпозиции и методы, использующие точную и приближенную клеточную декомпозицию. По условию поставленной задачи, область интереса для полёта представлена в виде прямоугольника или выпуклого многоугольника, не имеющего запрещенных для полета зон и препятствий. Для решения такого класса задач используются подходы без декомпозиции рабочей области. Миссии, выполняемые на областях правильной формы с помощью одного БпЛА, обычно не требуют дополнительного разложения на более мелкие области. Для исследования таких участков достаточно простых геометрических паттернов движения. Наиболее распро-

страненные паттерны – возвратно-поступательное движение (the back-and-forth) и спираль (the spiral). Первый вариант наиболее популярен при реализации упомянутых подходов к управлению полетом [18,19]. В этом варианте траектории состоят из прямых линий в обоих направлениях с маневрами под прямым углом в конце каждой прямой. Второй подход реализует траекторию, проходящую по внешним вершинам области и сходящуюся по спирали к центральной точке области исследования.

Одной из основных проблем, связанных с движением БПЛА, является ограниченный заряд аккумулятора и, как следствие, непродолжительное время полета. Во время маневров при повороте БПЛА должны замедляться, совершать поворот и снова ускоряться, увеличивая время полета и, следовательно, потребление энергии. Кроме того, существенное влияние на время полета оказывают погодные условия [20]. Согласно приведенным в работе [20] экспериментам, направление траектории покрытия должно быть перпендикулярно направлению ветра, чтобы минимизировать время полета.

Некоторые исследователи стремятся минимизировать расстояние, время полета или число маневров, чтобы снизить потребление энергии. Так, например, сглаживание маневров БПЛА при повороте способствует сохранению постоянной скорости и уменьшению энергозатрат. В последнее время были разработаны современные энергоэффективные алгоритмы возвратно-поступательного движения [21] и движения по спирали [22], которые в основном касаются оптимизации энергопотребления на прямых участках пути с учетом ограничений аккумуляторов БПЛА [23]. Согласно рассмотренным работам, основными критериями эффективности популярных алгоритмов СРР являются уменьшение времени полета и уменьшение потребления энергии БПЛА.

Далее описан предлагаемый подход к решению задачи покрытия проекцией лазерного излучения обширных прямоугольных областей без препятствий. Особенностью предлагаемого подхода является то, что он учитывает размер проекции лазерного луча при распределении путевых точек на заданной территории, что позволяет обеспечить равномерное покрытие обрабатываемого поля. Кроме того, предлагаемый подход можно использовать с любым лазерным устройством.

3. Подход к решению задачи покрытия проекцией лазерного луча с заданными характеристиками обширных прямоугольных областей без препятствий. В отличие от алгоритма лазерной обработки, предложенного в работе [16], мы предлагаем следующую последовательность действий для реализации процесса лазерной фотоактива-

ции посредством БПЛА. Заранее определяются размеры и координаты обрабатываемого участка поля. На основании этих данных оператор с клавиатуры наземного пункта управления задаёт координаты участка для облучения, скорость и высоту полёта. Модуль планирования пути, установленный на БПЛА, рассчитывает оптимальную траекторию, которая покрывает весь заданный участок. Точка взлёта может находиться на некотором расстоянии от обрабатываемого участка. После занесения всех входных данных для расчета траектории, оператор, через наземную станцию, отправляет на БПЛА команду о запуске полётного задания. Далее всё полетное задание выполняется без участия человека. После набора рабочей высоты БПЛА движется вдоль запланированной траектории. На борту БПЛА установлен RTK GPS – устройство, реализующее систему дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем и позволяющее существенно повысить точность позиционирования. Благодаря использованию датчика RTK GPS в составе аппаратного обеспечения БПЛА, отклонение от траектории движения не превышает 5–10 см. После завершения обработки заданного участка лазер отключается, а БПЛА возвращается в точку старта по рассчитанному наикратчайшему пути до неё и совершает автоматическую посадку. За счет наличия блока планировщика траектории, равномерно покрывающей участок облучения, на БПЛА можно использовать лазерную установку с разными оптическими характеристиками. Это обусловлено тем, что алгоритм планирования пути учитывает оптические характеристики (площадь проекции лазерного луча) лазерной установки при построении траектории.

Рассмотрим работу алгоритма планирования пути более подробно. Для расчета траектории движения БПЛА на участке облучения сперва необходимо рассчитать площадь проекции луча лазера на землю. Площадь проекции лазерного излучения напрямую зависит от угла веерного пучка лазерного модуля и высоты облучения. Произведем расчет площади проекции лазерного излучения и времени выполнения миссии.

Входными параметрами для расчета зависимости требуемых параметров лазерной установки от высоты полета БПЛА являются параметры обрабатываемого участка: длина l и ширина m поля, высота h , на которой происходит обработка поля и параметры лазерной установки – угол веерного пучка β и поверхностная плотность энергии излучения w .

Сперва необходимо рассчитать длину лазерной проекции ml на высоте h :

$$ml = 2 * h * tg\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

Площадь лазерной проекции S , соответственно, будет равна:

$$S = (2 * h * tg\left(\frac{\beta}{2}\right))^2.$$

Рассчитаем требуемую мощность лазерного излучения P_l :

$$P_l = S * w.$$

Зная площадь лазерной проекции, можно рассчитать скорость БПЛА v , с которой будет происходить обработка поля:

$$v = \frac{\sqrt{S}}{T_1},$$

где T_1 – единичное время излучения. На рисунке 1 приведено схематическое изображение рассчитываемых величин.

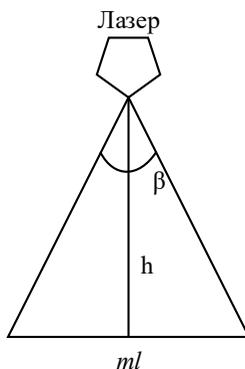


Рис.1. Схематическое изображение лазера и проекции лазерного излучения на поверхность

Для того чтобы правильно рассчитать время автономной работы БПЛА до окончания его энергетических запасов (разрешенное время

обработки T), примем время t_{return} , как необходимое время для возврата БПЛА на стартовую позицию. Это обеспечит БПЛА возможностью вернуться на стартовую позицию из конечной точки покрывающей территории. Время t_{return} рассчитывается как сумма времени движения БПЛА от самого удаленного участка поля $t_{diagonal}$ и фиксированное время для осуществления посадки t_{land} :

$$t_{return} = t_{diagonal} + t_{land},$$

где $t_{diagonal}$ – время движения БПЛА вдоль диагонали облучаемого поля и рассчитывается как:

$$t_{diagonal} = \frac{\sqrt{m^2 + l^2}}{v_{cp}},$$

где v_{cp} – это средняя горизонтальная скорость движения БПЛА по прямой.

Произведем расчет общего времени обработки поля $T_{общ}$:

$$T_{общ} = N * t,$$

где N – количество аккумуляторов БПЛА, которое можно рассчитать по формуле $N = \frac{\tau}{T}$, τ – это предварительное время, рассчитанное по формуле:

$$\tau = \frac{S_n}{S} * T_1,$$

где S_n — это площадь обрабатываемого поля.

Произведем численный расчет параметров лазера по предложенным формулам. Имея следующие параметры поля: $l = 200$ м, $m = 30$ м, $h = 10$ м, $T_1 = 3$ с, $t = 1080$ с (18 мин) и параметры лазерной установки: $\beta = 6^\circ$ и $w = 1$ Вт/м², получим следующие характеристики обработки: необходимая мощность лазера $P_l = 1,099$ Вт, а общее вре-

мя обработки поля $T_{\text{общ}} = 20480$ с или 5,6 часов. Исходя из этих требований можно подобрать БПЛА, удовлетворяющий данным характеристикам или разбить задачу обработки целого поля на подзадачи обработки более мелких участков.

Для расчета покрывающей траектории полета БПЛА был разработан алгоритм, который рассчитывает траекторию СРР на основе возвратно-поступательного движения. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2.

Траектория рассчитывается в двумерной плоскости, поскольку предполагается, что БПЛА совершает миссию на фиксированной высоте. На вход алгоритма подаются стартовая координата БПЛА (по условиям задачи стартовая и конечная координаты совпадают $X_s Y_s = X_t Y_t$), координаты вершин облучаемого участка $M = [X_1 Y_1; \dots; X_4 Y_4]$ и шаг покрытия L (ширина проекции лазерного луча). Далее вычисляется количество линий покрытия (количество отдельных прямолинейных участков траектории, необходимых для заполнения облучаемого участка с шагом L): $N_l = a / L(1-s)$, где a – наименьшая сторона прямоугольника для оптимального направления покрытия [24], $s \in (0,1)$ представляет собой долю перекрытия между двумя участками. Расстояние в метрах между двумя участками траектории равно: $d_l = a / N_l$.

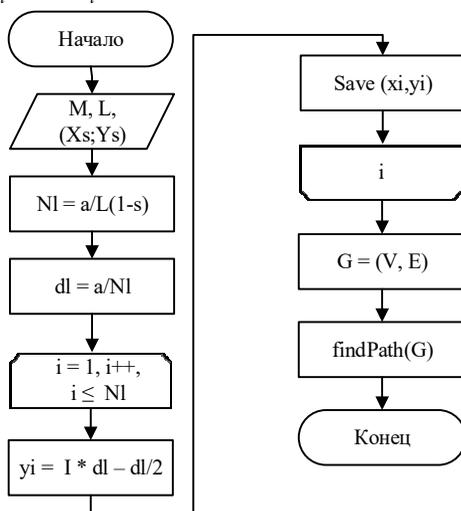
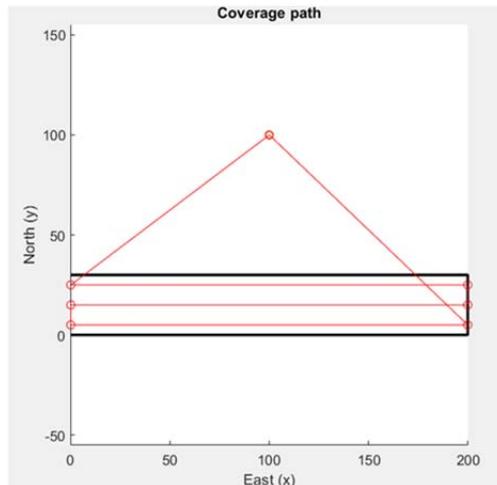


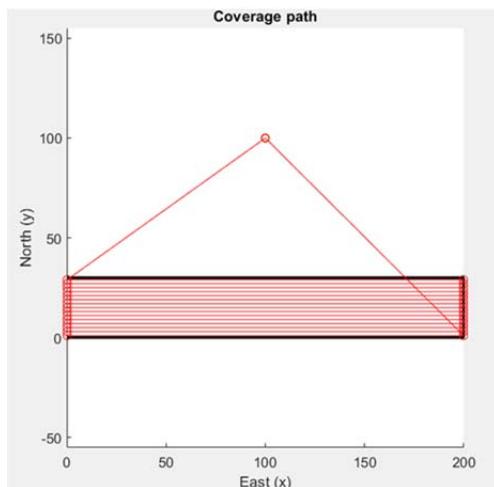
Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма расчета покрывающей траектории

Предполагая, что прямоугольник, представляющий область облучения, повернут таким образом, что оптимальное направление покрытия параллельно оси Ox глобальной системы отсчета, линии покрытия могут быть определены двумя точками (x, y) с координатами y , заданными как: $y_i = i \times d_l - 0.5d_l$, $i = 1, \dots, N_l$. А координаты x определяются точками, в которых горизонтальная прямая с координатой y_i пересекает границы области, которая должна быть покрыта. Крайние точки рядов покрытия вместе с координатами стартовой позиции БПЛА представляются набором узлов V графа $G = (V, E)$. Каждый узел графа пронумерован так, чтобы стартовая позиция получила номер 1, узлы, относящиеся к первому ряду покрытия, получили номера 2 и 3, те, что связаны со вторым рядом, помечены как 4 и 5 и так далее. В конце каждый участок траектории связывается с последующими четными и нечетными узлами. Набор ребер E состоит из всех линий, соединяющих N узлов графа, таким образом образуя полный граф.

Для того чтобы найти путь на этом графе для решения задачи СРР, воспользуемся методом на основе возвратно-поступательного движения, представленном в работе [25]. На выходе получим массив координат, который составляет траекторию, вдоль которой необходимо двигаться БПЛА для облучения участка. Результаты работы алгоритма расчета покрывающей траектории представлены на рисунке 3.



а)



б)

Рис. 3. Спланированные траектории для участка размером 200 на 30 м с шагом: а) 10 м, б) 2 м

На рисунке границы облучаемой области выделены черной линией. Красная линия – это рассчитанная покрывающая траектория. Ключевые точки, где БПЛА совершает поворот на 90° , выделены красным. Стартовая и конечная координаты совпадают и находятся в точке (100, 100). Время, затраченное на расчёт траекторий на участке 200 на 30 м, не превышает 0,05 с.

4. Теоретические эксперименты. В целях проверки работы предлагаемого алгоритма лазерной обработки растений было проведено 3 эксперимента. Первый эксперимент предполагает обработку поля размерами 100 на 100 м (1 га), второй – 500 на 500 м (25 га), третий – 1000 на 1000 м (100 га). Изменяемыми параметрами были: время расчёта покрывающей траектории, запланированное время полёта вдоль этой траектории, необходимое количество аккумуляторов для завершения одного цикла обработки и длина рассчитанного пути (время работы БПЛА от одного аккумулятора 1080 с). Для расчёта были взяты следующие данные: скорость БПЛА – 0,3 м/с, время облучения единичной площади проекции лазерного излучения T_1 – 3 с, высота облучения – 10 м. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты теоретических экспериментов

Эксперимент №1				
Площадь проекции лазерного излучения, м ²	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт
1	0,0263	13:40:22	49200	46
100	0,0055	1:30:22	5400	5
10000	0,004	0:13:08	780	1
122500	-	-	-	-
250000	-	-	-	-
Эксперимент №2				
Площадь проекции лазерного излучения, м ²	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт (время работы одного аккумулятора 1080 с)
1	0,0561	9 дней 2:15:56	-	-
100	0,0478	22:27:03	80820	75
10000	0,0039	2:47:33	10020	9
122500	0,0043	1:20:23	4800	4
250000	0,003	0:54:35	3240	3
Эксперимент №3				
Площадь проекции лазерного излучения, м ²	Время расчета пути, с	Запланированное время полёта, чч:мм:сс	Запланированное время полёта, с	Количество аккумуляторов, шт (время работы одного аккумулятора 1080 с)
1	0,1566	29 суток	-	-
100	0,0192	3 дня 15:52:48	-	-
10000	0,0085	10:09:59	36540	34
122500	0,0073	2:48:43	10080	9
250000	0,0074	1:49:53	6540	6

Все вычисления проводились на вычислительной машине с процессором Intel Core i7 2,4 ГГц и 16 ГБ оперативной памяти. Как показано в таблице, время расчета покрывающей траектории для всех экспериментов не превышает 1 с. Оптимальное значение площади проекции лазерного излучения для предлагаемого в работе алгоритма обработки растений – 10000 м (1 га). Для обработки обширных территорий за меньшее время необходимо увеличивать площадь проекции

лазерного излучения. Это можно сделать двумя способами: увеличить угол веерного пучка или увеличить высоту, на которой происходит обработка растений. Однако в таком случае необходимо произвести перерасчет мощности лазерной установки и времени облучения единичной площади для сохранения характеристик облучения.

5. Практические эксперименты. Для проведения полевых экспериментов была разработана специальная установка для лазерной обработки растений на с/х территориях. Внешний вид установки представлен на рисунке 4.

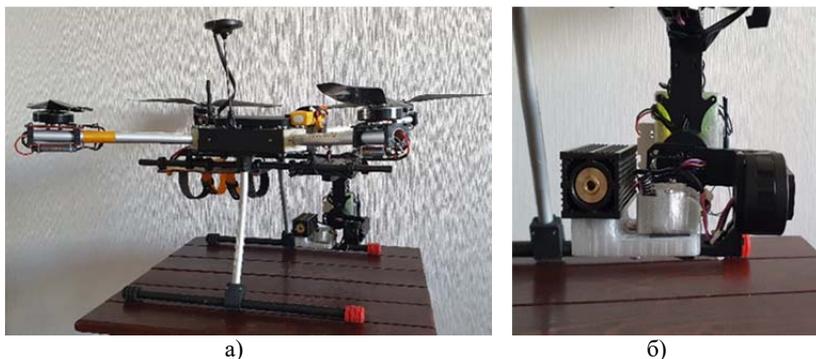


Рис. 4. Специальная робототехническая установка для лазерной обработки с/х культур

На рисунке 4,а представлен общий вид робототехнического устройства для фотостимуляции растений. Устройство состоит из двух частей: БПЛА со специализированным креплением и блока лазерной установки (рис.4,б).

Характеристики БПЛА: время полета 18-22 мин; масса полезной нагрузки 4 кг; взлетная масса 6 кг; максимальная высота полета 1500 м, максимальная скорость полета – 60 км/ч., дальность полета в ручном режиме (с пульта управления) ограничена дальностью связи и составляет 1500-2000 м, а дальность полёта в автономном режиме зависит от запаса энергии и равна 10000 м. Данный квадрокоптер имеет полетный контроллер Pixhawk 4 (с прошивкой PX4). В полетный контроллер встроена инерциальная система навигации, включающая акселерометр, гироскоп и магнитометр, а также барометр. Кроме того, БПЛА оснащен датчиком RTK GPS для высокоточного позиционирования БПЛА в пространстве. Лазерный модуль состоит из лазерного диода, оптической линзы, стабилизатора напряжения и драйвера лазерного диода. Лазерный модуль питается от аккумулятора 2200 мА/ч.

Излучение лазерного модуля имеет форму квадрата 1 на 1 м. Длина волны лазерного излучения равна 638 нм. Характеристики лазерного модуля: постоянная мощность лазера – 1 Вт, поверхностная плотность энергии – 1 Вт/м², угол веерного пучка – 6°.

Для проведения полевого эксперимента был подготовлен специальный опытный участок. На БПЛА был закреплен блок с устройством лазерного излучения (рис. 5). Высота, на которой находится БПЛА на рис.5, равна 1,5 м. Это сделано с целью визуализации работы лазерной установки. Лазерная обработка осуществлялась с высоты полета 10 м, при этом на поле проецировалось квадратное световое пятно размером 1 x 1 метр. Время обработки одного участка с растениями при ширине светового пятна 1 м было задано 3 с. При движении БПЛА со скоростью 0,3 м/с время обработки поля длиной в 200 м и шириной 1 м составило 9 мин. Облучение всходов вегетирующих растений проводилось в два этапа.



Рис. 5. Разработанное устройство в действии

Результаты облучения растений маломощным лазером при помощи БПЛА и предложенного нами алгоритма сведены в таблицу 2. В таблице приведена высота и урожайность многолетних трав 2019 года посева в зависимости от воздействия лазерного облучения.

Таблица 2 Результаты применения алгоритма

Культура, сорт	Высота, см		Урожайность з/м, т/га	
	Контроль	БПЛА	Контроль	БПЛА
Злаковые травы				
Овсяница луговая Бинара	105	96	22,4	21,9
Райграс пастбищный ВИК 22	61	56	13,9	14,0
Фестулолиум Аллегра	61	67	13,6	16,7
Овсяница тростниковая Лира	86	91	20,5	16,4
Овсяница красная Диана	77	87	11,9	11,1
Ежа сборная Хлыновская	110	119	20,4	15,9
Бобовые травы				
Клевер луговой Надежный	85	97	22,1	16,4
Клевер луговой Стодолич	98	103	40,2	64,2
Клевер луговой Делец	103	106	43,0	45,2
Клевер гибридный Маяк	74	74	19,6	19,2
Клевер белый ВИК 70	37	42	23,7	14,0

Согласно методике полевого опыта, отбор проб в контрольной группе проводился случайно в каждом варианте 4 раза. В экспериментальной БПЛА группе отбиралось по 1 образцу. По злаковым травам в контроле НСР05 (наименьшая существенная разность для 5%-ного уровня значимости) составляет 1,043 т/га для зеленой массы и 18,6 кг/га для семян. По клеверам в контроле НСР05 составляет 0,98 т/га для зеленой массы и 5,81 кг/га для семян. В связи с тем, что 2021 год был нехарактерным (аномальным) для исследуемых сельскохозяйственных культур, поэтому необходимо провести дополнительные опыты для того, чтобы проследить тенденцию изменений по годам и посчитать НСР05 по двум факторам. Это позволит отобрать образцы 3-4 раза по каждому варианту – в контрольной и экспериментальной БПЛА группах.

Из полученных результатов видно, что облучение маломощным лазером повлияло на изменение высоты и урожайности с/х культур.

Среди злаковых трав наибольшего эффекта в повышении высоты травостоя удалось достичь при лазерном облучении с БпЛА овсяницы красной с. Диана. Здесь наблюдалось увеличение высоты растений на 13% по сравнению с необлучаемыми растениями контроля. Достаточно высок был также прирост травостоя после облучения у фестулолиума с. Аллегро (10%). Чуть менее выражен был эффект от облучения в аналогичных условиях у ежи сборной с. Хлыновская (8%) и у овсяницы тростниковой с. Лира (6%). Снижение же высоты растений после облучения наблюдалось у двух культур: овсяницы луговой Бинара и у райграса пастбищного (в обоих случаях на 8%). Относительно изменения урожайности зеленой массы (т/га) в результате облучения у злаковых трав наибольший положительный эффект был достигнут у фестулолиума с. Аллегро, урожайность которого увеличилась на 23%. Для остальных культур было характерно или незначительное изменение урожайности (увеличение у райграса пастбищного менее чем на 1% и снижение у овсяницы луговой с. Бинара на 2%), или некоторое снижение данного показателя – на 20 и 22% у овсяницы тростниковой с. Лира и ежи сборной с. Хлыновская соответственно, а также на 7% у овсяницы красной с. Диана.

Лазерная обработка с БпЛа также повлияла и на высоту и урожайность у бобовых трав. Изменение высоты растений происходило для всех культур, кроме клевера гибридного с. Маяк, в случае которого изменения высоты травостоя не произошло. А наиболее заметно увеличилась высота растений клевера лугового с. Надежный (на 14%) и клевера белого с. ВИК 70 (на 13%). Менее существенно увеличилась высота клевера лугового с. Стодолич (на 5%) и клевера лугового с. Делец (на 3%). Оценим влияние лазерного излучения на урожайность бобовых трав. Значительное увеличение урожайности зеленой массы было достигнуто для клевера лугового с. Стодолич – 60%. Менее существенное увеличение урожайности было зафиксировано для клевера лугового с. Делец – 5 %. Лазерное излучение отрицательно повлияло на урожайность клевера гибридного с. Маяк, в случае которого было зафиксировано снижение урожайности на 2 %. Более значительным снижением урожайности было у клевера белого с. ВИК 70 (на 41 %) и у клевера лугового с. Надежный (на 26%).

Таким образом, полученные данные показывают, что лазерное облучение для большей части изучаемых культур увеличивало высоту травостоя (у злаковых – на четырех из шести культур, у бобовых – на четырех из пяти изучаемых культур). В то же время увеличение урожайности зеленой массы наблюдалось у меньшего числа культур (у злаковых – на двух из шести культур, у бобовых – на двух из пяти изу-

чаемых культур). То есть полученный в результате лазерного облучения эффект увеличения травостоя не всегда находил продолжение в увеличении урожайности зеленой массы как злаковых, так и бобовых трав. Однако полная оценка эффективности лазерной стимуляции при обработке кормовых культур возможна после подсчета содержания сырого протеина в кг на 1 га. Тем не менее технология облучения растений является перспективным направлением в современной агропромышленности. Использование специальной установки и разработанного алгоритма для облучения растений позволяет добиться равномерной обработки обширных с/х участков.

Преимуществами разработанной установки являются высокая точность позиционирования за счет RTK GPS, возможность находиться на некотором расстоянии от обрабатываемого участка, чтобы лазерное излучение не попадало на оператора и другую аппаратуру. К преимуществам разработанного алгоритма облучения относится его универсальность. Предлагаемый алгоритм построения пути для равномерного лазерного облучения участка учитывает площадь проекции лазерного луча для обеспечения требуемых характеристик излучения при использовании любой лазерной установки.

6. Заключение. Проблема планирования покрывающей траектории для БПЛА рассматривалась многими авторами. Как правило, исследуемые области прямоугольной формы не требуют каких-либо методов дискретизации или декомпозиции. Для прямоугольных участков используются паттерны возвратно-поступательного движения и движения по спирали. Главным преимуществом использования этих паттернов движения является относительно малое время вычислений для поиска покрывающей траектории, а сами вычисления могут выполняться на борту БПЛА. Время расчета покрывающей траектории при помощи разработанного алгоритма для всех рассмотренных экспериментов не превышает 1 с.

Для практического тестирования разработанных решений был разработан прототип устройства, предназначенного для лазерной обработки растений в фазе вегетации в ночное время. Был проведен полевой эксперимент, который заключался в лазерной обработке участка поля длиной в 200 м и шириной 1 м. Траектория полета была рассчитана разработанным алгоритмом планирования покрывающей траектории. При движении БПЛА вдоль этой траектории со скоростью 0,3 м/с время обработки поля составило 9 мин. Предложенный способ позволяет интегрировать на БПЛА лазерный модуль с любым углом излучения, так как алгоритм учитывает этот параметр при построении марш-

рута. Это доказывает универсальность метода с точки зрения используемой аппаратуры.

Применение БПЛА мультикоптерного вида для обработки с/х полей имеет ряд преимуществ: легкая настройка скорости движения при облучении, высоты облучения, площади покрытия лазером для расчёта оптимальной траектории полета; возможность удержания положения в точке обработки на заданное время; стабильный полёт за счет используемого контроллера (углы крена, тангажа и рыскания не меняются, поэтому лазерный луч падает строго вниз, без отклонений, равномерно покрывая весь участок облучения); возможность автономной работы (в память БПЛА записывается полетная миссия, которая выполняется полностью автономно, без участия оператора).

Однако при работе с БПЛА необходимо учитывать несколько важных аспектов, таких как физические характеристики аппарата, время работы, ограничения на вес полезной нагрузки, внешние условия окружающей среды и др. Кроме того, на эффективность работы БПЛА влияют маневры и погодные условия, которые увеличивают потребление энергии при выполнении полетов на открытом воздухе [26,27].

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию разработанного алгоритма: минимизацию длины пути БПЛА, времени выполнения миссии и количества поворотов, а также учет погодных условий при планировании маршрута. Также будут рассмотрены вопросы учета допустимого угла поворота и оптимальной скорости для минимизации потребления энергии.

Литература

1. Букатый В.И., Вечернина Н.А., Карманчиков В.П. Лазерная фотоактивация семян сельскохозяйственных культур Алтая // Известия Алтайского государственного университета. 2001. № 1. С. 98–99.
2. Rakosy-Tican L., Aurori C.M., Morariu V.V. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild Solanum species // Bioelectromagnetics. 2005. vol. 26. pp. 548–557.
3. Kovács E., Keresztes Á. Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells // Micron. 2002. vol. 33: pp. 199–210
4. Podlešný J. The effect of seed irradiation with laser and plant desiccation on yielding and quality features of white lupine seeds // Acta Agrophysica. 2007. vol. 9. Issue 3. pp. 733–745.
5. Chen Y.P., Jia J.F., Yue M. Effect of CO₂ laser radiation on physiological tolerance of wheat seedlings expose to chilling stress // Photochem Photobiol. 2010. vol. 86. pp. 600–605.
6. Инюшин В.М., Ильясов Г.У., Федорова Н.Н. Луч лазера и урожай // Издательство: Алма-Ата: Кайнар. 1981. 188 с.

7. Журба П.С., Журба Т.П., Журба Е.П. Способ промышленного возделывания сельскохозяйственных культур с использованием лазерного облучения // Патент РФ RU 2240663 С1. 2004.
8. Брижанский Л.В., Кузнецов П.Н., Кузнецова А.П. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на семена болгарского перца и огурца // Наука и Образование. 2019. Т. 2. № 4. С. 201.
9. Чельшьева Д.Н. Эффективность лазерного облучения семян тыквы и арбуза // Всероссийский Фестиваль науки студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК», посвященный 100-летию академика Д.К. Беляева: сборник материалов Всероссийских научно-методических конференций с международным участием. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА. 2017. С. 269–271.
10. Скотникова А.И. Влияние лазерного излучения на всхожесть и урожайность сельскохозяйственных культур // Молодежь - науке и практике АПК: материалы 100-й Международной научно-практической конференции студентов и магистрантов. Витебск: ВГАВМ. 2015. С. 90.
11. Будаговский А.В., Будаговская О.Н. Фотоника в сельском хозяйстве и природопользовании, перспективные направления развития // Лазер-Информ. 2016. № 15-16 (582–583). С. 1–7.
12. Курьянов С.А. Устройство для автоматического лазерного досвечивания растений // Материалы международной научно-практической конференции «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях». 2014. С. 222–225.
13. Курьянов С.А. Инфракрасная лазерная досветка как метод повышения продуктивности томатов. Материалы V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики (АПК)». 2014. С. 183–185.
14. Lottes P. et al. UAV-Based Crop and Weed Classification for Smart Farming. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 3024–3031.
15. Lebedev I., Izhboldina V. Method for Inspecting High-voltage Power Lines Using UAV Based on the RRT Algorithm. Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR) 2021). 2022. pp. 179–190.
16. Di Franco C., Buttazzo G. Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs // Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). 2015. pp. 111–117.
17. Di Franco C., Buttazzo G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints // J. Intell. Robot. Systems. 2016. pp. 1–18.
18. Choset H. Coverage for robotics—A survey of recent results // Ann. Math. Artif. Intell. 2001. pp. 113–126.
19. Andersen H.L. Path Planning for Search and Rescue Mission Using Multicopters // Master's Thesis. Institutt for Teknisk Kybernetikk. 2014. 137 p.
20. Coombes M., Chen W.H., Liu C. Boustrophedon Coverage Path Planning for UAV Aerial Surveys in Wind // Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 1563–1571.
21. Osborne M. Mission Planner-Ground Station. URL: <http://planner.ardupilot.com> (дата обращения: 21.08.2021).
22. Cabreira T.M., Di Franco C., Ferreira P.R., Jr., Buttazzo G.C. Energy-Aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications // IEEE Robot. Autom. Lett. 2018. vol. 3. pp. 3662–3668.
23. Cabreira T.M., Brisolaro L.B., Ferreira Jr. P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // Drones. 2019. vol. 3(1). pp. 4.

24. Avellar G.S., Pereira G.A., Pimenta L.C., Iscold P. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time // *Sensors*. 2015. vol. 15(11). pp. 27783–27803.
25. Vasquez-Gomez J.I., Marciano-Melchor M., Valentin L., Herrera-Lozada J.C. Coverage path planning for 2d convex regions // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. vol. 97(1). pp. 81–94.
26. Даниловских С.М., Даниловских М.Г., Винник Л.И. Способ лазерной обработки растений с беспилотного летательного аппарата // Патент РФ RU 2740543. 2021.
27. Barrientos A., et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area // *J. Field Robot.* 2011. vol. 28. pp. 667–689.

Севостьянова Наталья Николаевна — д-р биол. наук, доцент, директор, ООО «НовБиотех». Область научных интересов: биомедицина, биотехнологии, геронтология и гериатрия. Число научных публикаций — 95. snn79@yandex.ru; Парковая, 14-2, 173020, Великий Новгород, Россия; р.т.: +7(911)6223948.

Лебедев Игорь Владимирович — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: управление БПЛА, разработка конструкций БПЛА мультироторного типа. Число научных публикаций — 7. igorlevedev@gmail.com; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)3589135.

Лебедева Валерия Валентиновна — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: групповое управление, мультиагентные системы, БПЛА. Число научных публикаций — 6. izhboldina.valeriia@gmail.com; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(931)314940.

Ватаманюк Ирина Валерьевна — младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: групповая робототехника, алгоритмы навигации робототехнических систем. Число научных публикаций — 52. vatamaniuk@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-33-11.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счёт гранта по программе «Старт-1» от Фонда содействия инновациям (договор № 3653ГС1/60667).

N. SEVOSTYANOVA, I. LEBEDEV, V. LEBEDEVA, I. VATAMANIUK
**AN INNOVATIVE APPROACH TO AUTOMATED PHOTO-
ACTIVATION OF CROP ACREAGE USING UAVS TO
STIMULATE CROP GROWTH**

Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth.

Abstract. Photoactivation of plants by laser treatment is a promising direction in the development of modern agricultural production. Treatment of plants with radiation with specified characteristics stimulates the development of plants, the formation of generative traits and an increase in yield. An approach based on the use of a specialized laser installation mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV) is proposed to automate the process of photoactivation of large cultivated areas. It is possible to perform laser activation of large areas with minimal expenditure of time and human resources due to autonomous processing of the field with the help of UAVs. An algorithm for calculating a covering trajectory for covering large rectangular areas with a laser spot with given characteristics is proposed in the paper. A methodology for calculating the required power of the laser installation depending on the altitude and flight time of the UAV is presented. The advantage of the developed approach is its versatility, since this approach takes into account the characteristics of a laser installation and can be used with devices of various types. Depending on the laser parameters, the algorithm builds such a trajectory for the UAV so that the irradiation of plant seedlings is uniform throughout the entire processing process. Field experiments were conducted when the UAV moved along the calculated trajectory at a speed of 0.3 m/s and the average processing time for a field 200 m long and 1 m wide was 9 minutes. The results of field experiments show that laser irradiation on most of the studied crops increased the yield and height of the stand (in cereals - in four out of six crops, in legumes - in four out of five studied crops). The proposed algorithm for constructing a path for uniform laser irradiation of a site takes into account the area of the laser spot to ensure the required radiation characteristics when using any laser installation.

Keywords: laser installation, plant growth stimulation, UAV, agriculture, path planning, covering trajectory planning, low-power laser, laser photoactivation.

Sevostyanova Natalya — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Director, NovBiotech, LLC. Research interests: biomedicine, biotechnology, gerontology and geriatrics. The number of publications — 95. snn79@yandex.ru; 14-2, Parkovaya str., 173020, Veliky Novgorod, Russia; office phone: +7(911)6223948.

Lebedev Igor — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: uAV control, development of multirotor type UAV designs. The number of publications — 7. igorlebedev@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)3589135.

Lebedeva Valeria — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: group control, multi-agent systems, UAVs. The number of publications — 6. izhboldina.valeriia@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(931)314940.

Vatamaniuk Irina — Junior researcher, Laboratory of autonomous robotic systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: group robotics, algorithms of navigation of robotic systems. The number of publications — 52. vatamaniuk@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-33-11.

Acknowledgements. This research is supported by grant under the «Start-1» program from the Innovation Promotion Fund (contract No. 3653ГC1/60667).

References

1. Bukatjy V.I., Vechernina N.A., Karmanchikov V.P. [Laser photoactivation of seeds of agricultural crops in Altai]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta – Izvestiya – of Altai State University Journal*. 2001. vol. 1. pp. 98–99. (In Russ.).
2. Rakosy-Tican L., Aurori C.M., Morariu V.V. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild Solanum species. *Bioelectromagnetics*. 2005. vol. 26. pp. 548–557.
3. Kovács E., Keresztes Á. Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. *Micron*. 2002. vol. 33. pp. 199–210
4. Podlešny J. The effect of seed irradiation with laser and plant desiccation on yielding and quality features of white lupine seeds. *Acta Agrophysica*. 2007. vol. 9. Issue 3. pp. 733–745
5. Chen Y.P., Jia J.F., Yue M. Effect of CO₂ laser radiation on physiological tolerance of wheat seedlings expose to chilling stress. *Photochem Photobiol*. 2010. vol. 86. pp. 600–605.
6. Injushin V.M., Il'jasov G.U., Fedorova N.N. Luch lazera i urozhaj [Laser beam and harvest]. Izdatel'stvo: Alma-Ata: Kajnar. 1981.188 p. (In Russ.).
7. Zhurba P.S., Zhurba T.P., Zhurba E.P. Sposob promyshlennogo vozdeľyvanija sel'skohozjajstvennyh kul'tur s ispol'zovaniem lazernogo obluchenija [Method for Commercial Cultivation of Farm Crops with the Use of Laser Radiation]. Patent RF. 2004. 9 p. (In Russ.).
8. Brianski L.V., Kuznetsov P.N., Kuznetsova A.P. [Effect of Low-Intensity Laser Radiation on Bell Pepper and Cucumber Seeds]. *Nauka i Obrazovanie – Science and education*. 2019. vol. 2. no. 4. pp. 201. (In Russ.).
9. Chelysheva D.N. [Efficiency of Laser Irradiation of Pumpkin and Watermelon Seeds] // Vserossijskij Festival' nauki studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Nauka i molodezh': novye idei i reshenija v APK», posvjashhenyj 100-letiju akademika D.K. Beljaeva: sbornik materialov Vserossijskikh nauchno-metodicheskikh konferencij s mezhdunarodnym uchastiem [All-Russian Festival of Science of Students, Postgraduates and Young Scientists "Science and Youth: New Ideas and Solutions in the Agro-Industrial Complex", dedicated to the 100th anniversary of Academician D.K. Belyaeva: collection of materials from All-Russian scientific and methodological conferences with international participation]. Ivanovo: FGBOU VO Ivanovskaja GSHA. 2017. pp. 269–271. (In Russ.).
10. Skotnikova A.I. [Influence of laser radiation on the total and productivity of agricultural crops]. *Molodezh' - nauke i praktike APK: materialy 100-j Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii studentov i magistrantov [Youth – to the science and practice of the agro-industrial complex: materials of the 100th International scientific-practical conference of students and undergraduates]*. Vitebsk: VGAVM. 2015. pp. 90. (In Russ.).
11. Budagovskiy A.V., Budagovskaya O.N. [Photonics in agriculture and nature management, promising directions of development]. *Lazer-Inform – Lazer-Inform*. 2016. vol. 15-16 (582–583). pp. 1–7. (In Russ.).

12. Kur'yanov S.A. [Device for automatic laser supplementary illumination of plants]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Robototehnika v sel'skohozjajstvennyh tehnologijah» [Materials of the international scientific-practical conference "Robotics in agricultural technologies"]. 2014. pp. 222–225. (In Russ.).
13. Kur'yanov S.A. [Infrared laser supplementary lighting as a method of increasing the productivity of tomatoes]. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy jenergetiki (APK)» [Materials of the V International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of Energy (AIC)"]. 2014. pp. 183–185. (In Russ.).
14. Lottes P. et al. UAV-Based Crop and Weed Classification for Smart Farming. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 3024–3031.
15. Lebedev I., Izhboldina V. Method for Inspecting High-voltage Power Lines Using UAV Based on the RRT Algorithm. Proceedings of 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR) 2021). 2022. pp. 179-190.
16. Danilovskikh S.M., Danilovskikh M.G., Vinnik L.I. Sposob lazernoj obrabotki rastenij s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Method for laser processing of plants from an unmanned aerial vehicle]. Patent RF RU 2740543. 2021. (In Russ.).
17. Di Franco C., Buttazzo G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints. J. Intell. Robot. Systems. 2016. pp. 1–18.
18. Choset H. Coverage for robotics—A survey of recent results. Ann. Math. Artif. Intell. 2001. pp. 113–126.
19. Andersen H.L. Path Planning for Search and Rescue Mission Using Multicopters. Master's Thesis. Institutt for Teknisk Kybernetikk. 2014. 137 p.
20. Coombes M., Chen W.H., Liu C. Boustrophedon Coverage Path Planning for UAV Aerial Surveys in Wind. Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 1563–1571.
21. Osborne M. Mission Planner-Ground Station. Available at: <http://planner.ardupilot.com> (accessed: 21.08.2021).
22. Cabreira T.M., Di Franco C., Ferreira P.R., Jr., Buttazzo G.C. Energy-Aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications. IEEE Robot. Autom. Lett. 2018. vol. 3. pp. 3662–3668.
23. Cabreira T.M., Brisolara L.B., Ferreira Jr. P.R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. Drones. 2019. vol. 3(1). pp. 4.
24. Avellar G.S., Pereira G.A., Pimenta L.C., Iscold P. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time. Sensors. 2015. vol. 15(11). pp. 27783–27803.
25. Vasquez-Gomez J.I., Marciano-Melchor M., Valentin L., Herrera-Lozada J.C. Coverage path planning for 2d convex regions. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2020. vol. 97(1). pp. 81–94.
26. Danilovskikh S.M., Danilovskikh M.G., Vinnik L.I. Sposob lazernoj obrabotki rastenij s bespilotnogo letatel'nogo apparata // Patent RF RU 2740543. 2021.
27. Barrientos A., et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area. J. Field Robot. 2011. vol. 28. pp. 667–689.