

Труды МАИ. 2023. № 129  
Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья  
УДК 528.88  
DOI: [10.34759/trd-2023-129-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-22)

## ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЦИКЛЕВОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА

**Дилан Азиз оглы Гумбатов**

Национальное аэрокосмическое агентство,  
Баку, Азербайджанская Республика

[H.Dilan@mail.ru](mailto:H.Dilan@mail.ru)

*Аннотация.* Статья посвящена анализу и синтезу оптимальных многоциклевых систем дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрены и решены две задачи оптимизации. В первой задаче циклы измерений в количестве  $n$  отличаются тем, что высота полета в каждом цикле различна и ставится задача определить оптимальную зависимость между высотой полета и длительностью цикла. Показано, что специально сформированный функционал цели, названный «площадью полета БПЛА», достигнет минимума, если высота полета будет убывать по мере увеличения длительности цикла измерений. Вторая задача оптимизации предусматривает вычисление оптимальной зависимости длительности цикла от длины дистанции пройденной в течение одного цикла.

Показано, что при наличии прямой связи между указанными показателями количество информации, добываемой в многоцикловом режиме, достигает максимальной величины.

**Ключевые слова:** многоцикловый режим, дистанционное зондирование, беспилотный летательный аппарат, оптимизация, высота полета

**Для цитирования:** Гумбатов Дилан Азиз оглы. Оптимизация многоцикловой системы дистанционного зондирования с применением БПЛА // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-22)

Original article

## **OPTIMIZATION OF A MULTI-CYCLE REMOTE SENSING SYSTEM USING UAVS**

**Dilan Aziz oglu Gumbatov**

National Aerospace Agency,  
Baku, Republic of Azerbaijan

[H.Dilan@mail.ru](mailto:H.Dilan@mail.ru)

**Abstract.** The subject of the study is multi-cycle remote sensing systems, particularly, the optimal multi-cycle remote sensing systems based on unmanned aerial vehicles (UAVs). Analysis and synthesis of a multi-cycle remote sensing mode is being realized by measuring equipment installed on the UAV. Two optimization problems are considered and solved. In the first problem, measurement cycles in the number of  $n$  differ in the fact that the flight altitude in every cycle is different, and the problem of determining the optimal relationship between the flight altitude and the cycle duration is being set. The second optimization

problem envisages computing the optimal dependence of the cycle duration on the length of the distance traveled during one cycle.

As the result of solving the first problem, the author shows that a specially formed functional of the target, called the “UAV flight area”, will reach its minimum if the flight altitude is decreasing so far as the duration of the measurement cycle is increasing. The result of the second problem solution reveals the amount of information obtained in multi-cycle mode reaches its maximum value given a direct interrelation between the said indicators.

The results obtained in this work may be applied while the development and application of remote sensing systems, based on the unmanned aerial vehicles, operating in a multi-cycle mode.

The main inference of the study consists in the fact that remote sensing systems operating in multi-cycle mode may be optimized by various criteria. The optimization criterion selection herewith depends on the purpose set for the concrete realization of the remote sensing system based on the UAV.

**Keywords:** multicycle mode, remote sensing, unmanned aerial vehicle, optimization, flight altitude

**For citation:** Dilan Aziz oglu Gumbatov. Optimization of a multi-cycle remote sensing system using UAVS. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-22)

## **Введение**

Развитие беспилотной авиации в последние десятилетия бесспорно имеет направление болес широкого использования основных преимуществ БПЛА и

успешного решения задач ограничивающих их широкое применение. Например, как приводится в работе [1], дистанционное зондирование, осуществляемое при групповом полете БПЛА требует разработку новых алгоритмов систем управления и навигации таких систем.

Согласно [2], такие преимущества БПЛА при реализации дистанционного зондирования как высокое пространственное разрешение, возможность использования мультисенсорных данных, гибкость в интегрировании сенсоров диктует необходимость усовершенствования известных решений в области таких задач, как классификация земельного покрытия, обнаружение изменений, тематическое картирование. Как отмечается в работе [3], главной тенденцией в проектировании военной летательной техники является переход от боевых пилотируемых летательных аппаратов к беспилотным авиационным комплексам. Согласно [4], основной тенденцией развития беспилотной авиации является рост размеров БПЛА, полезной нагрузки, высоты полета и дальности. При этом растет активность и эффективность использования высотных БПЛА в качестве платформы-носителя средств воздушной оперативной разведки как стратегического так и тактического плана [5]. Что касается сфер использования БПЛА, то область их использования достаточно широк и включает мониторинг объектов капитального строительства [6], включая объекты трубопроводного транспорта [7], мониторинг и аэрофотосъемки [8], проведение геологоразведочных и поисково-оценочных работ [9], мониторинг природного очага различных заболеваний [10], изучение горнорудных ландшафтов [11], мониторинг сельскохозяйственных угодий [12] и др. объединенных в общем широком классе задач дистанционного зондирования.

Многоэтапные или многоциклевые технологии дистанционного зондирования обычно применяются для повышения информативности таких систем путем повышения точности, достоверности и правдоподобия получаемых результатов [13-17]. Так, например, в работе [13] сообщается о применении многоступенчатой технологии оценки оптически активных и неактивных параметров с использованием таких моделей как сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети, многослойные персептроны, и др. Оценка таких составляющих в воде позволяет дистанционно определить качество воды используя получаемые многошаговые оценки указанных составляющих. В работе [14] указывается, что для исследования и предсказания растительного покрова земли необходимо иметь сверхточные, попиксельные устройства прогноза состояния покрова земли с использованием временной серии снимков дистанционного зондирования.

В работе [15] предложена полностью необучаемая многоступенчатая схема регистрации космических снимков для подбора соответствующих пар изображений. В работе [16] рассмотрена возможность использования данных о растительности на разных этапах его развития для построения модели прогноза индекса LAI этой растительности. При этом предусматривается использование данных таких сенсоров, установленных на БПЛА, как гиперспектрометр, мультиспектрометр, лидар и др. с использованием различных алгоритмов машинного обучения. Вопросы разработки гибкой платформы на базе БПЛА для многоциклевого сбора данных с различных устройств дистанционного зондирования изложены в работе [17].

Вместе с тем, многоциклевые и многоэтапные технологии обработки и сбора данных дистанционного зондирования предполагают обслуживание не только

одноциклевых, но и многоциклевых систем зондирования, обслуживая таким образом, данные поступающие с таких систем в течение различных циклов их работы.

Говоря о многоциклевом дистанционном зондировании в данной работе, понимаем процесс зондирования, при котором носитель измерительной аппаратуры, в рассматриваемом случае беспилотный летательный аппарат, проходит дистанции, которые изменяются по длине по определенному закону. Например, если БПЛА должен пройти дистанции  $L_i$ , где  $i = 1(n - 1)$ .  $i$ -индекс, указывающий номер цикла полета, последовательно, в порядке их увеличения,

$$L_{i+1} = L_i + \Delta L; \Delta L = const \quad (1)$$

то при постоянной скорости передвижения БПЛА получим множество времен прохождения этих дистанций  $T_i$ , где

$$T_i = \frac{L_i}{v} \quad (2)$$

-скорость передвижения БПЛА.

Таким образом, рассматриваемый многоциклевый режим дистанционного зондирования характеризуется тем, что операции зондирования осуществляются в интервалах множества  $L$  где

$$L = \{L_i\} \quad (3)$$

и множества  $T_i$ , где

$$T = \{T_i\} \quad (4)$$

С учетом (1) и (2) напишем

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{L_1 + \Delta L}{v} - \frac{L_1}{v} = \frac{\Delta L}{v} \quad (5)$$

Следовательно, в рассматриваемом режиме имеем:

$$\Delta L = \text{const}; \Delta T = \text{const}; v = \text{const}$$

Отметим, что такой режим полета носителя измерительной аппаратуры дистанционного зондирования характерен для тех случаев, когда на каждом интервале  $T_i$  осуществляется изменение режима полета, например, корректируется высота полета.

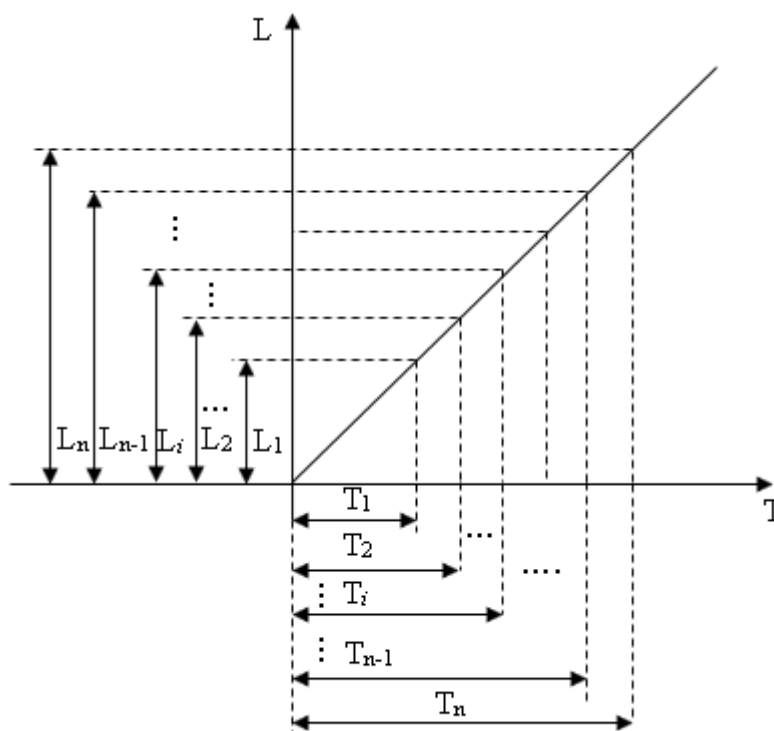


Рис. 1 Графическое отображение основных показателей полета БПЛА в режиме многоциклового дистанционного зондирования с постоянной скоростью передвижения

Согласно [18] высота полета БПЛА может быть связана с такими показателями видеокамеры, установленной на его борту, как фокусное расстояние  $f$ , размер пиксела  $p$ , геометрический интервал между двумя близлежащими отсчетами на объекте GSD (Ground Sampling Distance) следующим образом

$$H = \frac{0,01 \cdot GSD \cdot f}{p} \quad (6)$$

При этом, скорость полет полета БПЛА определяется как [19]

$$V = \frac{GSD}{2T_3} \quad (7)$$

где:  $T_3$ -время экспозиции.

С учетом (2) и (7) имеем

$$L_i = \frac{T_i \cdot GSD}{2T_3} \quad (8)$$

Из (6) получим

$$GSD = \frac{HP}{0,01 \cdot f} \quad (9)$$

Учитывая (9) в (8) напишем, приняв  $H = H_i$  где  $H_i$ -высота полета в  $i$ -м цикле полета.

$$L_i = \frac{T_i \cdot H_i \cdot P}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} \quad (10)$$

Умножим левую и правую стороны на  $H$ . Имеем

$$H_i \cdot L_i = \frac{T_i H_i^2 p}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} \quad (11)$$

С точки зрения энергопотребления показатель  $S_i$ , где

$$S_i = H_i \cdot L_i \quad (12)$$

должен иметь некоторое минимальное значение, т.к.  $H_i$  и  $L_i$  являются факторами, способствующими увеличению энергопотребления БПЛА в течение полета. С учетом (11) и (12) составим сумму

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \frac{T_i H_i^2}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} \quad (13)$$



Условно показатель  $S_0$  можно условно назвать суммарной площадью полета.

Введем на рассмотрение функциональную зависимость

$$H_i = \varphi(T_i) \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) запишем

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \frac{T_i \varphi(T_i)^2}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} \quad (15)$$

Дискретную модель (15) заменим на непрерывную. Имеем

$$S_{0.H} = \frac{1}{T_{max}} \int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{T \varphi(T)^2}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} dT \quad (16)$$

В отношении введенной функции  $\varphi(T)$  примем следующее ограничительное условие

$$\int_{T_{min}}^{T_{max}} \varphi(T) dT = C; \quad C = const \quad (17)$$

Для вычисления оптимального вида функции  $\varphi(T)$  на базе (16) и (17) составим задачу безусловной вариационной оптимизации. Целевой функционал  $F_1$  этой задачи имеет вид:

$$F = \frac{1}{T_{max}} \int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{T \varphi(T)^2}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} dT + \lambda_1 \left[ \int_{T_{min}}^{T_{max}} \varphi(T) dT - C \right] \quad (18)$$

где:  $\lambda_1$ -множитель Лагранжа.

Решение задачи (18) согласно методу Эйлера [20] должна удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{T \varphi(T)^2}{2T_3 \cdot 0,01 \cdot f} + \lambda_1 \varphi(T) \right\}}{d\varphi(T)} = 0 \quad (19)$$

Из (19) получим

$$\frac{\varphi(T) \cdot T}{c_1} + \lambda_1 = 0 \quad (20)$$

где:

$$C_1 = T_{max} \cdot T_э \cdot 0,01 \cdot f \quad (21)$$

Из (20) получим

$$\varphi(T) = -\frac{C_1 \cdot \lambda_1}{T} \quad (22)$$

С учетом (17) и (22) получим

$$-\int_{T_{min}}^{T_{max}} \frac{C_1 \cdot \lambda_1}{T} dT = C \quad (23)$$

Из (23) получим

$$\lambda_1 = -\frac{C}{C_1 \ln\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right)} \quad (24)$$

На базе (22) и (24) получаем

$$H = \varphi(T) = -\frac{C}{T \ln\left(\frac{T_{max}}{T_{min}}\right)} \quad (25)$$

При решении (25) функционал  $F$  достигает минимума, т.к. производная (20) по  $\varphi(T)$  оказывается всегда положительной величиной. Таким образом, согласно полученному решению, в оптимальном режиме многоциклого полета БПЛА с ростом  $T$  (или  $T_i$  в дискретной модели) высота полета должна уменьшаться по выражению (25).

В отличие от вышерассмотренной задачи по минимизации показателя  $S_0$  в режиме многоциклого полета БПЛА, где по существу, оптимизация осуществлена по энергетическому критерию, далее рассматривается задача оптимизации многоциклого режима полета БПЛА по информационному критерию.

Из выражения (8) получим

$$T_3 = \frac{T_i \cdot GSD}{2L_i} \quad (26)$$

В первом приближении примем, что выходной сигнал спектрометрической аппаратуры  $U_{sp}$  прямо пропорционален значению  $T_3$ , т.е.

$$U_{sp} = k \cdot T_3 \quad (27)$$

С учетом (26) и (27) получим

$$U_{sp} = \frac{T_i \cdot GSD \cdot k}{2L_i} \quad (28)$$

Если допустить, что в радиометрическом канале имеются шумы  $\Delta U$ , то энтропию измерительного сигнала определим при  $U_{sp}/\Delta U \gg 1$  как

$$\log_2 \frac{U_{sp}}{\Delta U} = \log_2 \frac{T_i \cdot GSD \cdot k}{2L_i \Delta U} \quad (29)$$

Количество информации,  $M_i$  вырабатываемое в течение цикла  $i$  определится как

$$M_i = \frac{L_i}{\Delta L} \log_2 \frac{U_{sp}}{\Delta U} = \frac{L_i}{\Delta L} \log_2 \frac{T_i \cdot GSD \cdot k}{2L_i \Delta U} \quad (30)$$

Вводя функциональную зависимость  $T_i = f(L_i)$  и далее правую сторону (30) интегрируя в интервале  $0 - L_{max}$  получим

$$M_i = \frac{1}{L_{max}} \int_0^{L_{max}} \frac{L}{\Delta L} \log_2 \frac{f(L) \cdot GSD \cdot k}{2L \cdot \Delta U} dL \quad (31)$$

По аналогии с (17), по отношению к функции  $f(L)$ , введем следующее ограничительное условие

$$\int_0^{L_{max}} f(L) dL = C_2 \quad (32)$$

На базе (21) и (22) составим оптимизационную задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал  $F_2$  которой имеет вид

$$F_2 = \frac{1}{L_{max}} \int_0^{L_{max}} \frac{L}{\Delta L} \log_2 \frac{f(L) \cdot GSD \cdot k}{2L \cdot \Delta U} dL + \lambda_2 \left[ \int_0^{L_{max}} f(L) dL - C_2 \right] \quad (33)$$

Решение оптимизационной задачи (33) согласно методу Эйлера должна удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{L}{L_{max}\cdot\Delta L}\log_2\frac{f(L)\cdot GSD\cdot k}{2L\cdot\Delta U}+\lambda_2 f(L)\right\}}{df(L)} = 0 \quad (34)$$

Из выражения (34) получаем

$$\frac{L}{L_{max}\cdot\Delta L(\ln 2)\cdot f(L)} + \lambda_2 = 0 \quad (35)$$

Из (35) находим:

$$f(L) = \frac{L}{\lambda_2\cdot L_{max}\cdot\Delta L(\ln 2)} \quad (36)$$

С учетом (32) и (36) получим

$$\int_0^{L_{max}} \frac{L}{\lambda_2\cdot L_{max}\cdot\Delta L(\ln 2)} dL = C_2 \quad (37)$$

Из (37) находим

$$\lambda_2 = \frac{1}{C_2\cdot L_{max}\cdot\Delta L(\ln 2)} \cdot \int_0^{L_{max}} L dL = \frac{L_{max}}{2C_2\cdot\Delta L(\ln 2)} \quad (38)$$

С учетом (36) и (38) получим

$$f(L) = \frac{2C_2 L}{L_{max}^2} \quad (39)$$

При решении (39) функционал  $F_2$  достигает максимума, т.к. производная (35) по  $f(L)$  всегда является отрицательной величиной.

Таким образом, согласно решению (39), в оптимальном режиме максимальная информативность многоциклевого режима полета БПЛА может быть обеспечен при обеспечении прямо пропорциональной связи между показателями  $L$  и  $T$ .

## Заключение

Сформулирована и решена задача оптимизации многоциклевом режиме дистанционного зондирования, осуществляемого с помощью измерительной аппаратуры, установленной на БПЛА.

Рассмотрены две задачи оптимизации. В первой задаче циклы измерений в количестве  $n$  отличаются тем, что высота полета в каждом цикле различна и следует определить оптимальный вид зависимости высоты полета от длительности цикла. Показано, что специально сформированный функционал цели, условно названный «площадью полета» БПЛА достигнет минимума, если высота полета будет убывать по мере увеличения длительности цикла измерений.

Вторая задача оптимизации предусматривает вычисление оптимальной зависимости длительности цикла от длины дистанции проходимого в течение одного цикла.

Показано, что при наличии прямо пропорциональной связи между указанным показателями количество информации добываемой в многоциклевом режиме достигает максимальной величины.

## Список источников

1. Pena F., Luna P., Isaac M., Ragab A. R., Elmenshawy K., Gomez D., Campoy P., Molina M. A proposed system for multi-UAVs in remote sensing operations // Sensors, 2022, vol. 22, pp. 9180. URL: <https://doi.org/10.3390/s22239180>
2. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications- A review // Remote Sensing, 2019, vol. 11, pp. 1443. DOI: 10.3390/rs11121443

3. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26769>
4. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
5. Каримов А.Х. Возможности беспилотных авиационных систем следующего поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26768>
6. Адамцевич Л.А., Воробьев П.Ю., Железнов Е.М. Технология мониторинга объектов капитального строительства на этапах жизненного цикла методами дистанционного зондирования с использованием беспилотных летательных аппаратов (дронов) на основе высокоточной цифровой модели объекта // Строительство и архитектура. 2021. Т. 9. № 3. С. 51-55. DOI: [10.29039/2308-0191-2021-9-3-51-55](https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-9-3-51-55)
7. Долгополов Д.В. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2020. Т. 25. № 4. С. 85-95. DOI: [10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95)
8. Студеникин А.В., Михалин В.А., Иванов Р.В., Магаршак С.И. Практика применения перспективных беспилотных летательных аппаратов для мониторинга и

аэрофотосъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 102-106.

9. Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Иванов И.Г., Жуков А.О. Применение беспилотных летательных аппаратов при геологоразведочных и поисково-оценочных работах // Исследование Земли из космоса. 2021. № 1. С. 78-88.

DOI: [10.31857/S0205961421010061](https://doi.org/10.31857/S0205961421010061)

10. Дубянский В.М., Цапко Н.В., Шапошникова Л.И., Дегтярев Д.Ю., Давыдова Н.А. и др. Использование беспилотного летательного аппарата для повышения эффективности мониторинга природного очага чумы // Здоровье населения и среда обитания-ЗНИСО. 2018. № 2. С. 52-56. DOI: [10.35627/2219-5238/2018-299-2-52-56](https://doi.org/10.35627/2219-5238/2018-299-2-52-56)

11. Айнакулов Ж.Ж., Макаренко Н.Г., Палташев Т.Т. Опыт моделирования горнорудных ландшафтов методами интеллектуального мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 43-50. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-7-43-50](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-7-43-50)

12. Купряшина Д.С., Базарова М.Т., Тюкленкова Е.П. Применение беспилотных летательных аппаратов при мониторинге сельскохозяйственных угодий Таджикистана // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 6. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2018/06/86696>

13. Ahmed M., Mumtaz R., Anwar Z., Shaukat A., Arif O., Shafait F. A multi-step approach for optically active and inactive water quality parameter estimation using deep learning and remote sensing // Water, 2022, vol. 14, pp. 2112. DOI: [10.3390/w14132112](https://doi.org/10.3390/w14132112)

14. Yan J., Chen X., Chen Y., Liang D. Multistep prediction of land cover from dense time series remote sensing images with temporal convolutional networks // IEEE Journal of

Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, vol. 13. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9184116>

15. Papadomanolaki M., Christodoulidis S., Karantzas K., Vakalopoulou M. Unsupervised multistep deformable registration of remote sensing imagery based on deep learning // Remote Sensing, 2021, vol. 13, pp. 1294. DOI: [10.3390/rs13071294](https://doi.org/10.3390/rs13071294)

16. Zhang Y., Yang Y., Zhang Q., Duan R., Liu J., Qin Y., Wang X. Toward multi-stage phenotyping of soybean with multimodal UAV sensor data: a comparison of machine learning approaches for leaf area index estimation // Remote Sensing, 2023, vol. 15. DOI: [10.3390/rs13071294](https://doi.org/10.3390/rs13071294)

17. Polonelli T., Qin Y., Yeatman E. M., Benini L., Boyle D. A flexible, Low-power platform for UAV-based data collection from remote sensors // IEEE Access, 2020, pp. 3021370. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3021370](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021370)

18. Pranchai A., Zonklin N., Sirirueang K. A comparative evaluation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for forest survey // Journal of Tropical Forest Research, 2019, 3(1), 54-61.

19. Liu C., Akbar A., Wu H. Dynamic model constrained optimal flight speed determination of surveying UAV under wind condition // 26th International Conference on Geoinformatics, 2018. DOI: [10.1109/GEOINFORMATICS.2018.8557071](https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2018.8557071)

20. Эльгольц Л.Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1974. – 432 с.



## References

1. Pena F., Luna P., Isaac M., Ragab A. R., Elmenhawy K., Gomez D., Campoy P., Molina M. A proposed system for multi-UAVs in remote sensing operations, *Sensors*, 2022, vol. 22, pp. 9180. URL: <https://doi.org/10.3390/s22239180>
2. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications- A review, *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, pp. 1443. DOI: 10.3390/rs11121443
3. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26769>
4. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
5. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26768>
6. Adamtsevich L.A., Vorob'ev P.Yu., Zheleznov E.M. *Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 51-55. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-51-55
7. Dolgopolov D.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 85-95. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95
8. Studenikin A.V., Mikhalin V.A., Ivanov R.V., Magarshak S.I. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 4, pp. 102-106.
9. Ivanova Yu.N., Ivanov K.S., Bondareva M.K., Ivanov I.G., Zhukov A.O. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, no. 1, pp. 78-88. DOI: 10.31857/S0205961421010061
10. Dubyanskii V.M., Tsapko N.V., Shaposhnikova L.I., Degtyarev D.Yu., Davydova N.A. et al. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya-ZNISO*, 2018, no. 2, pp. 52-56. DOI: 10.35627/2219-5238/2018-299-2-52-56

11. Ainakulov Zh.Zh., Makarenko N.G., Paltashev T.T. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 7, pp. 43-50. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-43-50
12. Kupryashina D.S., Bazarova M.T., Tyuklenkova E.P. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2018, no. 6. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2018/06/86696>
13. Ahmed M., Mumtaz R., Anwar Z., Shaukat A., Arif O., Shafait F. A multi-step approach for optically active and inactive water quality parameter estimation using deep learning and remote sensing, *Water*, 2022, vol. 14, pp. 2112. DOI: 10.3390/w14132112
14. Yan J., Chen X., Chen Y., Liang D. Multistep prediction of land cover from dense time series remote sensing images with temporal convolutional networks, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, vol. 13. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9184116>
15. Papadomanolaki M., Christodoulidis S., Karantzas K., Vakalopoulou M. Unsupervised multistep deformable registration of remote sensing imagery based on deep learning, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, pp. 1294. DOI: 10.3390/rs13071294
16. Zhang Y., Yang Y., Zhang Q., Duan R., Liu J., Qin Y., Wang X. Toward multi-stage phenotyping of soybean with multimodal UAV sensor data: a comparison of machine learning approaches for leaf area index estimation, *Remote Sensing*, 2023, vol. 15. DOI: 10.3390/rs13071294
17. Polonelli T., Qin Y., Yeatman E. M., Benini L., Boyle D. A flexible, Low-power platform for UAV-based data collection from remote sensors, *IEEE Access*, 2020, pp. 3021370. DOI:10.1109/ACCESS.2020.3021370

18. Pranchai A., Zonklin N., Sirirueang K. A comparative evaluation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for forest survey, *Journal of Tropical Forest Research*, 2019, 3(1), 54-61.
19. Liu C., Akbar A., Wu H. Dynamic model constrained optimal flight speed determination of surveying UAV under wind condition, *26th International Conference on Geoinformatics*, 2018. DOI:10.1109/GEOINFORMATICS.2018.8557071
20. El'gol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1974, 472 p.

Статья поступила в редакцию 06.02.2023

Одобрена после рецензирования 15.02.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 06.02.2023; approved after reviewing on 15.02.2023; accepted for publication on 27.04.2023