

Научная статья

УДК 635.65; 528.854; 631.527

doi: 10.34655/bgsha. 2024.74.1.002

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI НА СЕЛЕКЦИОННЫХ ПОСЕВАХ ГОРОХА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Елена Викторовна Кожухова¹, Ирина Юрьевна Ботвич²,
Дмитрий Владимирович Емельянов³

¹Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

^{2,3}Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

¹elena.kojuhova@yandex.ru

²irina.pugacheva@mail.ru

³dima9526@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по выявлению наиболее приемлемых периодов развития культуры *Pisum sativum* L. для установления связи между индексом NDVI и следующими важными в селекции культуры показателями – урожайности, морфотипа, длины растений, устойчивости к полеганию. Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем проводится на основе оценки вариабельности посевов по вегетационным индексам, в частности NDVI, с помощью аэрофотосъемки на мультиспектральную и другие виды камер. Исследования проводились в 2021 – 2022 годах в питомнике конкурсного сортоиспытания гороха ФИЦ КНЦ СО РАН, в котором располагалось 462 деланки – 33 образца гороха посевного в 4-кратной повторности, учетная площадь каждой деланки 15 м². Выявлено, что наибольшие значения индекс NDVI на посевах гороха принимает в период, предшествующий цветению и полного цветения культуры, спад показателя индекса приходится на период плодообразования. Максимальная корреляционная связь индекса NDVI с селекционными признаками также характерна для этого периода развития растений. Направление корреляционной связи не изменялось по годам, однако его величина по некоторым показателям существенно различалась, изменяясь по длине стебля от слабой ($r=0,27$) до средней ($r=0,65$) положительной, по морфотипу – от средней ($r=0,50$) до сильной ($r=0,82$) положительной. Сопряженность индекса с урожайностью за 2021 – 2022 годы была средней положительной ($r=0,32$), с устойчивостью к полеганию – средней отрицательной ($r= -0,42$). Таким образом, в перспективе мультиспектральная съемка может использоваться для определения разновидности сортов, существенно различающихся по таким важным сортовым параметрам, как длина растений, их морфотип, а также в определении возможной полегамости посевов.

Ключевые слова: NDVI, горох, вегетационный период, корреляция, урожайность, морфотип, длина растений

THE USE OF THE NDVI VEGETATION INDEX ON SELECTIVE PEA CROPS IN EASTERN SIBERIA

Elena V. Kozhukhova¹, Irina Yu. Botvich², Dmitry V. Emelyanov³

¹Krasnoyarsk Scientific Research Institute of Agriculture Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russia

^{2,3}Institute of Biophysics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

¹elena.kojuhova@yandex.ru

²irina.pugacheva@mail.ru

³dima9526@gmail.com

Abstract. The article deals with the results of the research aimed at the identification of the most acceptable periods of development of *Pisum sativum* L. crop to establish a link between the NDVI index and the following important indicators for crops breeding: yield, morphotype, plant length, lodging resistance. Digital monitoring of indicators of agroecosystems was carried out on the basis of assessing the variability of crops sowing according to vegetation indices, in particular NDVI index, using aerial photography on multispectral and other types of cameras. The research was carried out in 2021-2022 in the breeding nursery of the competitive variety trial of peas of the FRC KSC SB RAS, where 462 plots were with 33 samples of seeded peas in a 4-fold repetition, the accounting area of each plot was 15 m². The study showed that NDVI index on pea crops took the greatest values during the period preceding flowering and full flowering of the crop, the decline of the index was observed during the period of fruit formation. The maximum correlation of the NDVI index with breeding features was also characteristic of this period of plant development. The direction of the correlation has not changed over the years, however its value has varied significantly according to some indicators – varying in stem length from weak ($r=0.27$) to medium ($r=0.65$) positive, in morphotype - from medium ($r=0.50$) to strong ($r=0.82$) positive. The conjugacy of the index with the 2021-2022 yield was average positive ($r=0.32$), with the resistance to lodging – average negative ($r= -0.42$). In the future, multispectral photography can be used to determine the types of varieties that differ significantly according to such important parameters as plant length, morphotypes, as well as to determine the possible lodging of crops.

Keywords: NDVI, peas, vegetation period, correlation, yield, morphotype, plant length

Введение. Горох, по данным управления статистики сельского хозяйства, на сегодняшний день является наиболее распространенной из зернобобовых культур в Российской Федерации, занимая более 50% площадей под зернобобовыми [1, 2].

В период перехода к цифровизации набирает обороты возможность прогнозирования на селекционных и семеноводческих посевах таких параметров, как полегание посева, что очень актуально для гороха, а также определение сортовых особенностей – морфотипа, длины растений.

С целью мониторинга состояния посевов представляется возможным ис-

пользование беспилотных летательных аппаратов [3, 4, 5].

Возможность применения беспилотных технологий для прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных посевов ранее была подтверждена рядом исследований [6, 7, 8]. Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем проводится на основе оценки вариабельности посевов по вегетационным индексам с помощью аэрофотосъемки на мультиспектральную и другие виды камер [9].

В качестве количественного показателя фотосинтетически активной биомассы растений зачастую используется нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference

Vegetation Index) [10]. Величина индекса NDVI отражает величину фотосинтезирующей поверхности и изменяется пропорционально уже достигнутому уровню [11].

В красной области спектра – от 0,6 до 0,7 мкм – находится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом растений, а в инфракрасной области – от 0,7 до 1,0 мкм – область максимального отражения клеточных структур листа. В практике высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему – в инфракрасной [12, 13].

Наиболее приемлемые периоды для определения коэффициента на посевах гороха и его связь с основными сортовыми признаками изучена недостаточно, чем вызвана актуальность проводимых исследований.

Цель исследований: выявить наиболее приемлемые периоды развития культуры *Pisum Sativum L.* для установления связи между следующими селекционно-важными параметрами гороха: урожайность, морфотип, длина растений, устойчивость к полеганию и индексом NDVI, а также определить характер и величину этого взаимодействия.

Условия, материалы и методы исследования. Исследования проводились в 2021 – 2022 годах в питомнике конкурсного сортоиспытания гороха ФИЦ КНЦ СО РАН, в котором располагалось 462 деланки – 33 образца гороха посевного в 4-кратной повторности, учетная площадь каждой деланки 15 м². На каждой деланке определялась урожайность, устойчивость к полеганию, длина растений, учитывался морфотип по шкале следующей градации – 1 – образцы с усатым типом листа, 1,5 – хамелеон, 2 – листочковый тип.

Мультиспектральная съемка посевов осуществлена с помощью беспилотного летательного аппарата DJI P4 Multispectral. Пространственное разреше-

ние – 17 см. По беспилотным спектрофотометрическим данным проводится расчет спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [14].

$$NDVI = \frac{b_5 - b_3}{b_5 + b_3}$$

В 2022 году был определен индекс для отслеживания динамики его изменения по всему вегетационному периоду.

Рассчитывалась линейная корреляция индекса NDVI в программе Excel в разные периоды роста и развития растений с показателями урожайности образцов, длиной растений (определяемой перед уборкой в лабораторных условиях), их морфотипом и устойчивостью к полеганию. Интерпретация коэффициента корреляции и расчет ошибки проводился по методике Доспехова [15].

Для анализа по двум годам индекс учитывался в период цветения культуры, приходящийся на первую декаду июля: 2021 года – 8 июля, 2022 года – 6 июля.

Результаты исследований и их обсуждения. Посев питомника был осуществлен 29 апреля, появление всходов отмечено 18 мая, начало периода цветения у самых рано зацветающих образцов – 27 июня, период полного цветения у большинства образцов в питомнике – 2 июля, в среднем, период цветения у основной массы образцов продолжался до 19 июля, максимальный – до 30 июля. Период хозяйственной спелости образцов, когда на большинстве растений созрело 60 – 70 % бобов, отмечался с 9 по 19 августа. Уборка питомника в связи с погодными условиями осуществлена только 4 сентября.

Максимальный NDVI отмечался в период, предшествующий цветению и полного цветения культуры. Спад показателя индекса начался в период плодообразования. С 3 августа уменьшение NDVI совпадает с началом периода созревания культуры, снижением процесса фотосинтеза и началом периода полегания образцов (рис. 1).



Рисунок 1. Изменение индекса NDVI за вегетационный период 2022 года (20 мая – 17 августа)

Корреляция с урожайностью селекционных образцов по всему вегетационному периоду культуры 2022 года была преимущественно слабой. Средняя прямая зависимость выявлялась только в период цветения культуры, т.е. при максималь-

ном значении индекса NDVI. В период, предшествующий уборке, направление зависимости менялось – корреляция становилась слабой и средней отрицательной (рис. 2).

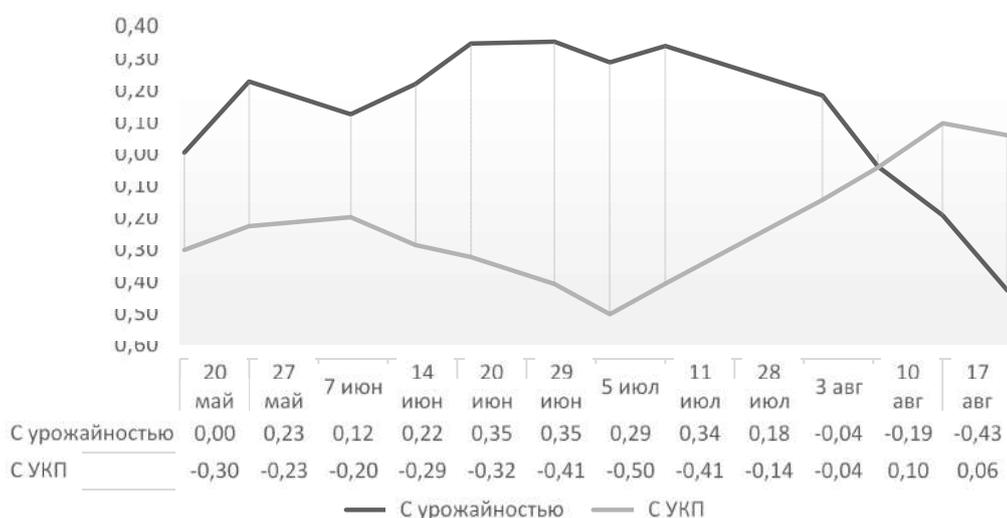


Рисунок 2. Корреляция (r) индекса NDVI с урожайностью и устойчивостью к полеганию (УКП)

Сопряженность коэффициента с устойчивостью к полеганию образцов показала среднюю отрицательную зависимость в период, предшествующий цветению, полного цветения и плодообразования культуры. Селекционные образцы, имеющие максимальный показатель фотосинтетически активной биомассы, являлись наиболее полегаемыми при максимальном коэффициенте корреляции, выявленным 5 июля $r = -0,504$ – средняя отрицательная корреляционная зависимость. Ошибка коэффициента была минимальной по всем показателям, находилась в пределах от 0,01 до 0,02.

Увеличение урожайности образцов

усиливает их полегание, что отразилось на зависимости между коэффициентом NDVI с УКП и урожайностью, она принимала противоположные по своему направлению значения с пересечением, проходящимся на 3 августа – период начала созревания культуры (рис. 2).

Длина растений – важный сортовой признак. Образцы гороха с укороченным стеблем, как правило, более устойчивы к полеганию, чем среднестебельные образцы. С длиной стебля растений максимальная корреляция прослеживалась также в период полного развития и цветения культуры и до начала её полегания.

При оценке связи с морфотипом сор-

тообразцов качественный показатель переводился в следующую его количественную интерпретацию: 1 – образцы с видоизмененным, усатым типом листа, 1,5 – хамелеоны, 2 – листочковые образ-

цы, т.е. большей облиственности образцов соответствовал больший показатель. С морфотипом в период цветения культуры выявлена сильная положительная связь (0,81 – 0,83) (рис. 3).

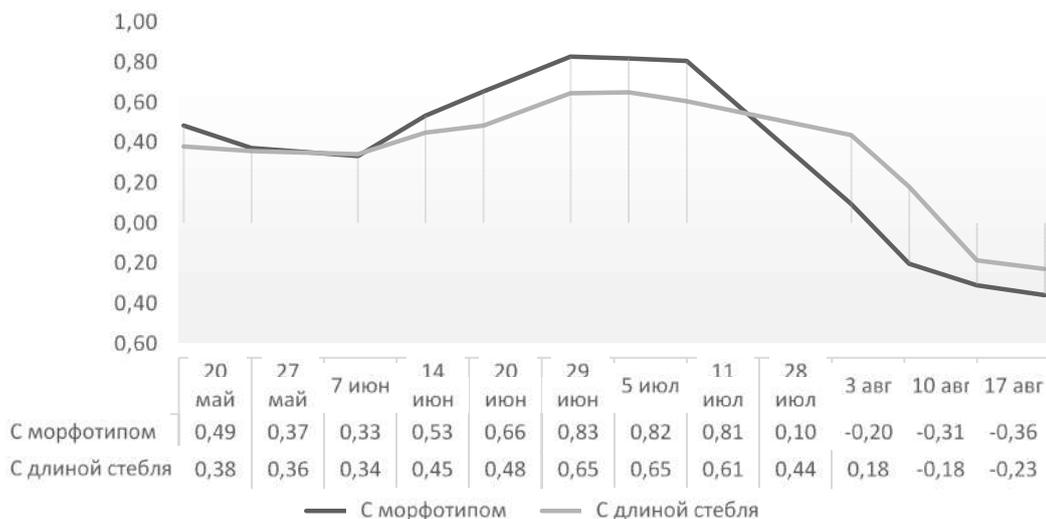


Рисунок 3. Корреляция (r) индекса NDVI с морфотипом и длиной стебля растений

За период 2021 – 2022 годов индекс учитывался в период цветения культуры, приходящийся на первую декаду июля. Дата съемки 2021 года – 8 июля, 2022 года – 5 июля. Направление корреляционной связи не изменялось по годам, однако его величина по некоторым показателям существенно различалась, изменяясь

по длине стебля от слабой ($r=0,27$) до средней ($r=0,65$) положительной, по морфотипу – от средней ($r=0,50$) до сильной ($r=0,82$) положительной. Сопряженность индекса с урожайностью за 2021 – 2022 годы была средней положительной ($r=0,32$), с устойчивостью к полеганию – средней отрицательной ($r= -0,42$).

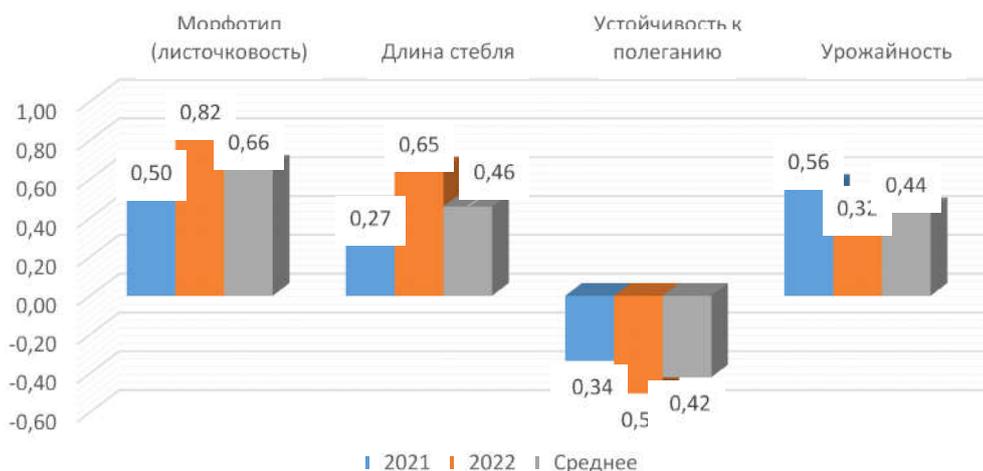


Рисунок 4. Корреляция между индексом NDVI (определенному в период цветения), урожайностью и основными хозяйственными признаками гороха (2021 – 2022)

Заключение. В результате исследований выявлено, что наибольшие значения индекса NDVI на посевах гороха при-

нимает в период цветения культуры. Максимальная корреляционная связь индекса NDVI с большинством хозяй-

ственно полезных признаков также выявлена в период цветения культуры – в Восточной Сибири это преимущественно первая декада июля.

Для образцов с наибольшим индексом (определяемым в период цветения) характерна большая облиственность (листочковый морфотип), наибольшая длина стебля, меньшая устойчивость к полега-

нию и большая урожайность.

В перспективе мультиспектральная съемка может использоваться апробаторами в определении разновидности сортов, существенно различающихся по таким важным сортовым параметрам, как длина растений, их морфотип, а также в определении возможной полегаемости посевов.

Список источников

1. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Государственная статистика. URL: www.fedstat.ru/ (дата обращения 20.10.2023)
2. Развитие производства зернобобовых и крупяных культур в России на основе использования селекционных достижений / В.И. Зотиков, А.А. Полухин, Н.В. Грядунова, В.С. Сидоренко, Н.Г. Хмызова // Зернобобовые и крупяные культуры. 2020. № 4 (36). С. 5–17. EDN: BPRYFH. doi: 10.24411/2309-348X-2020-11198.
3. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чащин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2019. № 2. С. 47–51. doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5
4. Cuaran Jose, Leon Jose Crop Monitoring using Unmanned Aerial Vehicles: A Review // Agricultural Reviews. 2021. № 42(2). Pp. 121-132. doi: 10.18805/ag.R-180
5. Mousa Kourouma J. and al. Assessing the spatiotemporal variability of NDVI and VCL as indices of crops productivity in Ethiopia: a remote sensing approach // Geomatics, natural hazards and risk. 2021. № 12 (1). Pp. 2880-2903 doi:10.1080/19475705.2021.1976849
6. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В., Белоусов И.С. Исследование развития и продуктивности сельскохозяйственных культур с применением беспилотных летательных аппаратов // Известия НВ АУК. 2019. 4 (56). 329-339. EDN: VQAVIV. doi: 10.32786/2071-9485-2019-04-38.
7. Кожухова Е.В., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Орешникова О.П. Применение беспилотных технологий для анализа технологичности и урожайности гороха // Роль аграрной науки в обеспечении продовольственной безопасности Сибири: материалы всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 2022. С. 77-81. doi: 10.52686/9785604525029_77
8. Сторчак И.В., Ерошенко Ф.В., Шестакова Е.О. Особенности динамики вегетационного индекса NDVI в различных почвенно-климатических зонах Ставропольского края // Аграрный вестник Урала. 2019. № 9 (188). С. 12 – 18. EDN: DDWLGC. doi: 10.32417/article_5daf47c545e434.25766589.
9. Оленин О.А., Зудилин С.Н., Осоргин Ю.В. Цифровой мониторинг показателей агроэкосистем на основе космических и беспилотных технологий // Пермский аграрный вестник. 2019. № 3 (27). С. 53-61 EDN: LWKWJO
10. Динамика трендов растительности Западной Сибири в условиях климатических изменений (по спутниковым данным) / И.Ю. Ботвич, Г.С. Высоцкая, С.А. Иванов, Т.И. Письман, А.П. Шевырногов // Техника и технологии. 2023. 16(2). С. 244–251. EDN: HTMBYS
11. Буховец А.Г., Кучеренко М.В., Семин Е.А. Прогнозирование урожайности зерновых культур с помощью динамической модели нормализованного относительного индекса растительности, учитывающей физиологические особенности развития сельскохозяйственных растений // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (70). С. 93 – 104. EDN: CTUDKL. doi: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_93
12. Баширова Ч.Ф. Индекс NDVI для дистанционного мониторинга растительности // Молодой ученый. 2019. № 31 (269). С. 30-31. EDN: UQQQJH
13. Гопп Н.В. Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 17. С. 200-205.
14. Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology. 1969. Vol. 50, Pp. 663–666.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва : Агропромиздат, 1985. 351 с.

References

1. Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). Government statistics. URL: www.fedstat.ru/ Access date 10.20.2023 (In Russ.)

2. Zotikov V.I., Polukhin A.A., Gryadunova N.V., Sidorenko V.S., Khmyzova N.G. Development of the production of leguminous and cereal crops in Russia based on the use of breeding achievements. *Legumes and great crops*. 2020: 4 (36): 5–17 (In Russ.). doi: 10.24411/2309-348X-2020-11198.
3. Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. The use of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*. 2019:2:47–51 (In Russ.). doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5
4. Cuaran Jose, Leon Jose Crop Monitoring using Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Agricultural Reviews*. 2021:42(2):121-132. doi: 10.18805/ag.R-180
5. Assessing the spatiotemporal variability of NDVI and VCL as indicators of crop productivity in Ethiopia: a remote sensing approach Mousa Kourouma J. and al. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2021:12(1):2880-2903. doi:10.1080/19475705.2021.1976849
6. Rogachev A.F., Melikhova E.V., Belousov I.S. Study of the development and productivity of agricultural crops using unmanned aerial vehicles. *Izvestia NV AUK*. 2019:4(56):329-339 (In Russ.). doi: 10.32786/2071-9485-2019-04-38.
7. Kozhukhova E.V., Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Oreshnikova O.P. Application of unmanned technologies to analyze the manufacturability and yield of peas. *The role of agricultural science in ensuring food security in Siberia. Proc. of the All-Russian Conf. with Int. Part*. Krasnoyarsk. 2022:77-81 (In Russ.). doi: 10.52686/9785604525029_77
8. Storchak I.V., Eroshenko F.V., Shestakova E.O. Features of the dynamics of the vegetation index NDVI in various soil and climatic zones of the Stavropol Territory. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019:9(188):12-18 (In Russ.). doi: 10.32417/article_5daf47c545e434.25766589.
9. Olenin O.A., Zudilin S.N., Osorgin Yu.V. Digital monitoring of agroecosystem indicators based on space and unmanned technologies. *Perm Agrarian Bulletin*. 2019:3(27):53-61 (In Russ.)
10. Botvich I.Yu. at al. Dynamics of vegetation trends in Western Siberia under conditions of climate change (according to satellite data). *Equipment and technologies*. 2023:16(2):244-251 (In Russ.)
11. Bukhovets A.G., Kucherenko M.V., Semin E.A. Forecasting the yield of grain crops using a dynamic model of the normalized relative vegetation index, taking into account the physiological characteristics of the development of agricultural plants. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*. 2021:3(70):93-104 (In Russ.). doi: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_93
12. Bashirova Ch.F. NDVI index for remote monitoring of vegetation *Young scientist*. 2019:31(269):30-31 (In Russ.)
13. Gopp N.V. Modeling of above-ground phytomass reserves of tundra plant communities using ground-based and satellite data. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2009:17:200-205 (In Russ.)
14. Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 1969:50:663-666.
15. Dosphehov B.A. *Methodology of field experience*. Moscow. Agropromizdat, 1985. 351 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Елена Викторовна Кожухова – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник;

Ирина Юрьевна Ботвич – научный сотрудник;

Дмитрий Владимирович Емельянов – ведущий инженер.

Information about the authors

Elena V. Kozhukhova – Candidate of Science (Agriculture), Leading researcher;

Irina Yu. Botvich – Research fellow;

Dmitry V. Emelyanov – Leading engineer.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023; одобрена после рецензирования 11.01.2024; принята к публикации 06.02.2024.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 11.01.2024; accepted for publication 06.02.2024.