

Научная статья/Research Article

УДК 528.714:633.11

DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18

Александр Андреевич Аюржанаев<sup>1✉</sup>, Юрий Михайлович Ильин<sup>2</sup>,  
Батор Валерьевич Содномов<sup>3</sup>, Маргарита Андреевна Жарникова<sup>4</sup>,  
Жаргалма Баторовна Алымбаева<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Бурятия, Россия

<sup>2</sup>Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, Бурятия, Россия

<sup>1</sup>aaayurzhanayev@yandex.ru

<sup>2</sup>ilbar50@mail.ru

<sup>3</sup>sodnomov@binm.ru

<sup>4</sup>zharnikova@binm.ru

<sup>5</sup>alymbaeva@binm.ru

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЪЕМКИ И ЗЕНИТНОГО УГЛА СОЛНЦА НА ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ ПШЕНИЦЫ ПО ДАННЫМ БПЛА

Цель исследования – оценка влияния высоты съемки и зенитного угла Солнца на цветные и спектральные вегетационные индексы (ВИ) пшеницы, полученные по данным съемки с БПЛА в условиях засушливого климата Забайкалья. Задачи: выполнить разновысотную аэрофотосъемку экспериментального поля при различных положениях Солнца; рассчитать ВИ и провести сравнительный статистический анализ полученных данных. Исследование проведено на учебно-мелиоративном полигоне Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова в пригороде г. Улан-Удэ 12 августа 2023 г. Экспериментальное поле площадью 600 м<sup>2</sup> засеяно пшеницей сорта Селенга, выведенного для засушливых условий Республики Бурятия. Поле разделено на 4 полосы с различными уровнями полива и богарным вариантом. Каждая полоса представлена 3 опытами НРК в трехкратной повторности. Оценка зависимостей проводилась в пределах одного варианта, разделенного на 20 одинаковых сегментов с целью соблюдения однородности выборки. Съемка участка экспериментального поля проведена на высотах от 40 до 200 м при зенитных углах Солнца от 36,5 до 74,5° с помощью БПЛА, оснащенных RGB- и мультиспектральной камерами. Рассчитаны цветные и спектральные ВИ. Группы цветных ВИ ExG-ExGR-GLI и ExR-NDI-VARI и спектральных ВИ NDVI-RVI и SAVI-DVI являются взаимно заменяемыми вследствие их высокой парной корреляции (более 0,99). Результаты теста Уилкоксона в основном показали сходство средних значений ВИ GLI, ExG, ExGR, а также NDVI и SAVI в период с 14:10 до 17:30, который является оптимальным для съемки. Средние значения ВИ уменьшаются с высотой и достоверно различаются, поэтому высота съемки должна учитываться при контроле состояния культур. Необходимо развитие научных основ беспилотного сельскохозяйственного мониторинга в различных климатических условиях.

**Ключевые слова:** вегетационные индексы, БПЛА, пшеница, высота съемки, зенитный угол Солнца

**Для цитирования:** Влияние высоты съемки и зенитного угла солнца на вегетационные индексы пшеницы по данным БПЛА / А.А. Аюржанаев [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2024. № 5. С. 12–18. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18.

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-26-00224).

Alexander Andreevich Ayurzhanayev<sup>1✉</sup>, Yuri Mikhailovich Ilyin<sup>2</sup>, Bator Valeryevich Sodnomov<sup>3</sup>, Margarita Andreevna Zharnikova<sup>4</sup>, Zhargalma Batorovna Alymbayeva<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude, Buryatia, Russia

<sup>2</sup>Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude, Buryatia, Russia

<sup>1</sup>aaayurzhanayev@yandex.ru

<sup>2</sup>ilbar50@mail.ru

<sup>3</sup>sodnomov@binm.ru

<sup>4</sup>zharnikova@binm.ru

<sup>5</sup>alymbayeva@binm.ru

## INFLUENCE OF SURVEYING ALTITUDE AND SOLAR ZENITH ANGLE ON WHEAT VEGETATION INDICES ACCORDING TO UAV DATA

*The purpose of the study is to assess the influence of the survey altitude and the solar zenith angle on the color and spectral vegetation indices (VI) of wheat obtained from survey data from a UAV in the arid climate of Transbaikalia. Tasks: to perform multi-altitude aerial photography of the experimental field at different positions of the Sun; to calculate the VI and conduct a comparative statistical analysis of the obtained data. The study was carried out at the training and reclamation site of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov in the suburbs of Ulan-Ude on August 12, 2023. An experimental field with an area of 600 m<sup>2</sup> is sown with Selenga wheat variety, bred for the arid conditions of the Republic of Buryatia. The field is divided into 4 strips with different levels of irrigation and rainfed option. Each lane is represented by 3 NPK experiments in triplicate. The assessment of dependencies was carried out within one variant, divided into 20 identical segments in order to maintain sample homogeneity. The survey of a section of the experimental field was carried out at altitudes from 40 to 200 m at solar zenith angles from 36.5 to 74.5° using UAVs equipped with RGB and multispectral cameras. Color and spectral VIs were calculated. The groups of color VIs ExG-ExGR-GLI and ExR-NDI-VARI and spectral VIs NDVI-RVI and SAVI-DVI are mutually interchangeable due to their high pairwise correlation (more than 0.99). The results of the Wilcoxon test generally showed the similarity of the average VI values of GLI, ExG, ExGR, as well as NDVI and SAVI during the period from 14:10 to 17:30, which is optimal for surveying. The average VI values decrease with height and differ significantly, so the surveying altitude should be taken into account when monitoring the condition of crops. It is necessary to develop the scientific foundations of unmanned agricultural monitoring in various climatic conditions.*

**Keywords:** vegetation indices, UAV, wheat, surveying altitude, solar zenith angle

**For citation:** Influence of surveying altitude and solar zenith angle on wheat vegetation indices according to UAV data / A.A. Ayurzhanayev [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2024;(5): 12–18 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18.

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation (project № 23-26-00224).

**Введение.** Интенсивный рост использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) гражданского назначения ознаменовал новый период в дистанционном зондировании – стали доступны данные лучшего пространственного, спектрального и временного разрешения. Одной из наиболее важных областей применения БПЛА является сельское хозяйство. С помощью беспилотных систем проводят инвентаризацию и мониторинг состояния посевов, осуществляют контроль персонала и техники, вносят удобрения, пестициды, инсектициды и др. [1, 2].

Получаемые в результате оптической съемки изображения используют для расчета вегетационных индексов (ВИ) в различных участках электромагнитного спектра с целью анализа состояния растительности. ВИ, рассчитанные по данным обычных RGB-камер, получили название цветных, или хроматических, для которых в отличие от спектральных ВИ используют красную, зеленую и синюю области спектра [3, 4].

Беспилотные системы имеют ценовые и временные преимущества по сравнению с дорогими авиационными работами, зависящими от облачности спутниковыми аппаратами и трудоемкими

наземными наблюдениями. Однако их использование в целях сельскохозяйственного мониторинга требует передовых навыков сбора, обработки и анализа разносторонних данных. Таким образом, актуальной общей проблемой является развитие научных основ беспилотного мониторинга агроценозов в разнообразных физико-географических условиях.

**Цель исследования** – оценка влияния высоты съемки и зенитного угла Солнца на цветные и спектральные вегетационные индексы пшеницы, полученные по данным съемки с БПЛА в условиях засушливого климата Забайкалья.

**Задачи:** выполнить разновысотную аэрофотосъемку экспериментального поля при различных положениях Солнца; рассчитать ВИ и провести сравнительный статистический анализ полученных данных.

**Объекты и методы.** Исследование проведено на учебно-мелиоративном полигоне Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова в пригороде

г. Улан-Удэ 12 августа 2023 г. Экспериментальное поле площадью 600 м<sup>2</sup> засеяно пшеницей сорта Селенга, выведенного для засушливых условий Республики Бурятия. Поле разделено на 4 полосы с различными уровнями полива и богарным вариантом. Каждая полоса представлена 3 опытами НРК в трехкратной повторности. В данной работе оценка зависимостей проводилась в пределах одного варианта, разделенного на 20 одинаковых сегментов с целью соблюдения однородности выборки.

Аэрофотосъемка осуществлена БПЛА DJI Mavic Pro и DJI Phantom Multispectral, оснащенными соответственно камерами с каналами R-G-B и R-G-B-NIR-RE. Время полетов выбрано таким образом, чтобы угол Солнца изменялся с шагом около 5°. Высота съемки для Mavic составляла 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200 м над уровнем земли. Из-за ограничений полетной зоны съемка Phantom проводилась только на высоте 60 м. Условия съемки – безоблачные, уровень экспокоррекции одинаковый – минус 1,3.

Таблица 1

**Время аэрофотосъемки и соответствующие зенитные углы Солнца**

Время	Угол, град.
13:00	36,5
14:10	39,5
15:05	45
15:45	50
16:20	55
16:55	60
17:30	65
18:00	70
18:30	74,5

В растровом калькуляторе ArcGIS Desktop проведен расчет следующих ВИ по данным спектральных цифровых значений изображений:  $NDI = (G-R)/(G+R)$ ,  $ExG = 2G-R-B$ ,  $ExR = 1,4R-G$ ,  $ExGR = 3G-2,4R-B$ ,  $VARI = (G-R)/(G+R-B)$ ,  $GLI = (2G-B-R)/(2G+B+R)$  – цветные ВИ;  $NDVI = (NIR-R)/(NIR+R)$ ,  $DVI = NIR-R$ ,  $RVI = NIR/R$ ,  $SAVI = 1,5 (NIR-R)/(NIR+R+0,5)$  – спектральные ВИ. Отметим, что для цветных индексов проведена нормировка цифрового значения канала на сумму  $R + G + B$ , а для спектральных индексов – на максимально возможное значение канала (для камер Phantom 4 Multispectral – 65535).

Для анализа тесноты связи между ВИ рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена при совпадающих высотах БПЛА и углах Солнца. Различия средних значений ВИ по условиям съемки оценены с помощью статистического критерия Уилкоксона для зависимых выборок.

**Результаты и их обсуждение.** В результате расчета попарных коэффициентов корреляции для всех ВИ при различных высотах и углах Солнца получено их общее количество – 1215. Среднее абсолютных значений коэффициентов составило 0,906, стандартное отклонение – 0,109, минимальное и максимальное значение – 0,363 и 0,999 соответственно. В большинстве

случаев корреляции статистически достоверны при уровне 95 %. С целью краткого представления результатов подсчитаны процентные доли коэффициентов выше среднего значения, сгруппированных по высоте съемки и углу Солнца (табл. 2). Так, например, на высоте 100 м (по всем углам Солнца) доля коэффициентов корреляции между индексами ExR и GLI со значением выше 0,906 составляет 33 %; при зенитном угле Солнца 50° (время съемки 15:45) доля коэффициентов корреляции между индексами ExG и NDI со значением выше 0,906 составляет 44 % по всем высотам.

В таблице 2 из рассмотрения исключены связи для пар ExG/ExGR, ExGR/GLI, ExG/GLI, ExR/NDI, NDI/VARI, ExR/VARI, поскольку они во всех случаях показывают 100 %-ю долю высоких значений коэффициента корреляции Спирмена. Таким образом, можно сделать вывод о взаимозаменяемости индексов ExG, ExGR, GLI и ExR, NDI, VARI. Анализ таблицы 2 показывает, что с увеличением высоты съемки корреляционная связь между индексами ослабевает; аналогичная закономерность наблюдается при увеличении зенитного угла Солнца.

Таблица 2

**Доля высоких значений коэффициентов корреляции ВИ для различных условий съемки**

Показатель	ExGR / ExR	ExGR / NDI	ExG / ExR	ExR / GLI	ExGR / VARI	ExG / NDI	GLI / NDI	GLI / VARI	ExG / VARI
<b>Высота съемки</b>									
h40	100	100	89	78	100	89	78	33	33
h50	100	100	67	67	56	56	56	33	33
h60	100	100	67	56	78	67	56	11	11
h75	100	100	56	44	44	22	11	0	0
h100	89	89	33	33	22	22	22	0	0
h125	89	78	33	33	33	11	22	0	0
h150	89	78	33	33	11	22	33	0	0
h175	78	78	11	11	22	0	11	0	0
h200	56	56	22	22	22	22	22	0	0
<b>Время съемки</b>									
13:00	89	89	56	56	44	44	44	0	0
14:10	100	100	100	100	78	67	89	33	33
15:05	100	100	67	67	44	33	44	22	22
15:45	100	100	44	44	56	44	44	11	11
16:20	89	89	33	22	33	33	22	11	11
16:55	78	78	44	33	44	33	22	0	0
17:30	89	67	22	11	22	22	11	0	0
18:00	78	78	22	22	33	11	11	0	0
18:30	78	78	22	22	33	22	22	0	0

Корреляционная зависимость между спектральными индексами NDVI, RVI, DVI, SAVI выражается в их очень высокой связи для высоты съемки 60 м. Наибольшие значения корреляции (0,99) характерны для пар индексов NDVI-RVI и SAVI-DVI, которые могут быть взаимно заменены.

Связь между спектральными и цветными индексами значительно ниже. Высокая корреляция между ними на высоте 60 м наблюдается в

14:10 и в среднем составляет  $0,87 \pm 0,03$ , затем с увеличением зенитного угла Солнца постепенно уменьшается до  $-0,19 \pm 0,07$ . Следовательно, наилучшее приближение съемка RGB-камерой к съемке мультиспектральными сенсорами дает в полуденное время.

Рассмотрим результаты теста Уилкоксона по сравнению средних значений ВИ на испытуемом участке поля при изменении условий аэрофото-

съемки. Выше показано, что некоторые индексы взаимозаменяемы вследствие их высокой корреляционной связи. Это также проявляется и в сравнительном анализе. Для примера: на рисунке 1 представлена диаграмма размаха средних значений ВИ GLI, ExG и ExGR по высотам от 40 до 200 м при угле Солнца 60° (соответ-

ствует съемке в 16:55). Выявлено, что с увеличением высоты происходит уменьшение средних значений индексов, при этом различия между ними достоверны ( $p < 0,05$ ), кроме высот 50 и 60 м. Подобная картина для указанных ВИ наблюдается при всех условиях съемки.

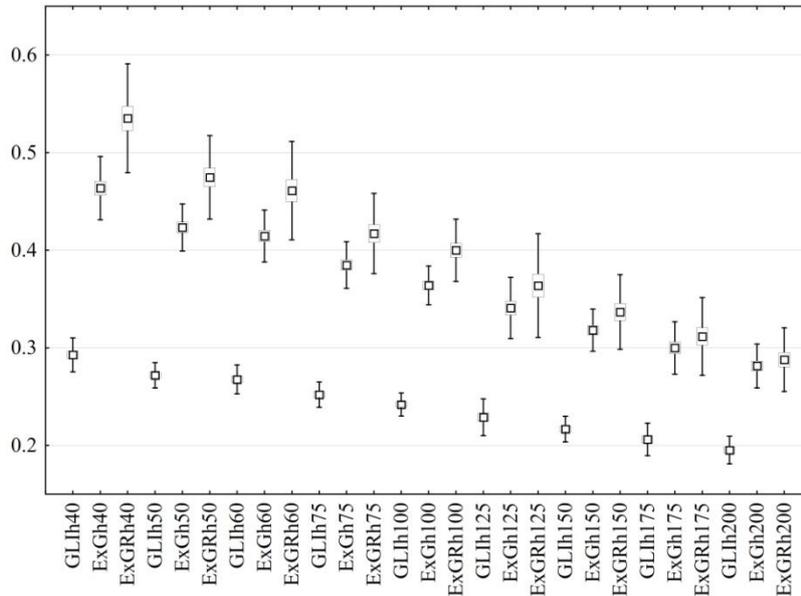


Рис. 1. Диаграмма размаха средних значений GLI, ExG и ExGR по высотам при угле Солнца 60°

Иная ситуация отмечается при фиксированной высоте съемки. Например, различия среднего значения GLI на высоте 125 м с углом Солнца 36,5° (время 13:00) со значениями, полученными во время съемки от 14:10 до 17:30, недостоверны. Схожие результаты с незначительными вариациями получены для ExG и ExGR (рис. 2, а) и для спектральных ВИ NDVI и

SAVI (рис. 2, б). Данный факт позволяет проводить съемку пшеницы в любое упомянутое время и получать одинаковые значения ВИ. Примечательной особенностью являются пониженные значения ВИ при больших зенитных углах Солнца в предзакатное время. Их средние значения отличаются от других положений Солнца.

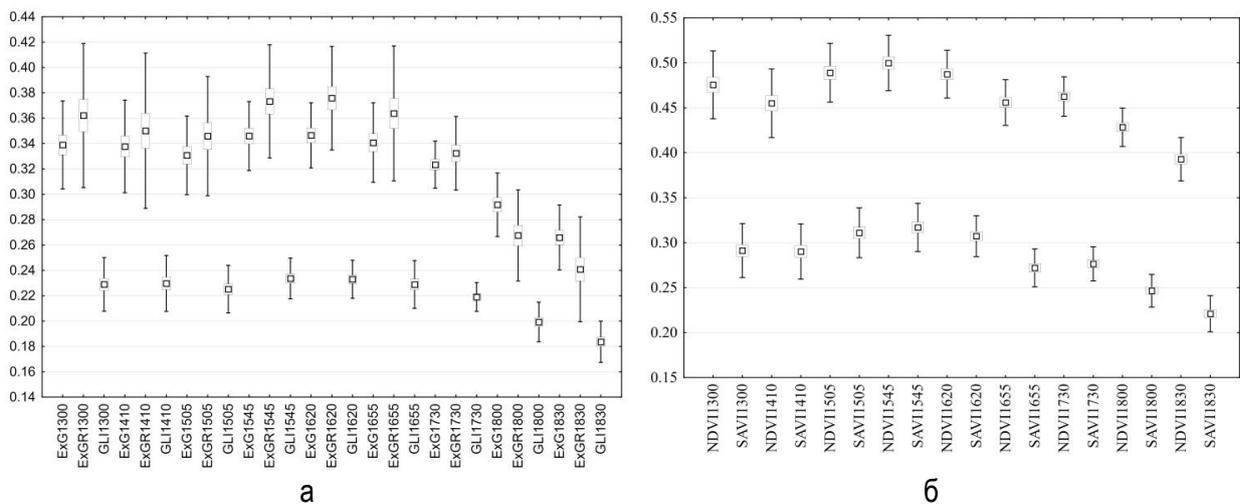


Рис. 2. Диаграмма размаха средних значений GLI, ExG, ExGR по углам Солнца на высоте 125 м (а) и NDVI, SAVI на высоте 60 м (б)

**Заключение.** В результате исследования проведен сравнительный анализ вегетационных индексов, полученных с помощью БПЛА при различных углах Солнца и высоте съемки. Выявлено, что в группах ВИ ExG-ExGR-GLI, ExR-NDI-VARI, NDVI-RVI, SAVI-DVI в целях контроля состояния культур может быть выбран один из этих индексов. Индексы GLI, NDVI, SAVI являются оптимальными в случае съемки в дневное время. Значения ВИ уменьшаются по мере увеличения высоты съемки – этот факт указывает на необходимость учета данного показателя при беспилотном сельскохозяйственном мониторинге.

Результаты исследования получены для однородного участка поля, поэтому окончательный выбор индекса следует проводить исходя из наилучшей способности индекса оценивать тот или иной показатель определенной сельскохозяйственной культуры. Это требует проведения специальных экспериментов по примеру [5]. Динамика ВИ может различаться в зависимости от физико-географических условий агроценозов [6] и характеристик съемочного оборудования [7]. Поэтому данное исследование вносит вклад в общее знание об особенностях мониторинга сельскохозяйственных культур в условиях аридного резко континентального климата.

#### Список источников

1. Катаев М.Ю. Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник КрасГАУ. 2023. № 1 (190). С. 54–62. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-54-62.
2. Определение высоты растений сельскохозяйственных культур на основе измерений беспилотных воздушных судов / Н.О. Мальчиков [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2020. № 12 (165). С. 46–53. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-12-46-53.
3. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multi-spectral and digital imagery / X. Zhou [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V.130. P. 246–255.
4. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction / A.A. Gitelson [et al.] // Remote Sens. Environ. 2002. V. 80. P. 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
5. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева / В.П. Якушев [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57, № 1. С. 98–112. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
6. Illumination Geometry and Flying Height Influence Surface Reflectance and NDVI Derived from Multispectral UAS Imagery / D. Stow [et al.] // Drones. 2019. V. 3, P. 55. DOI: 10.3390/drones3030055.
7. Quantifying Efficacy and Limits of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology for Weed Seedling Detection as Affected by Sensor Resolution / J.M. Pena [et al.] // Sensors. 2015. V.15. P. 5609–5626. DOI: 10.3390/s150305609.

#### References

1. Kataev M.Yu. Analiz prakticheskikh vozmozhnostej primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v sel'skom hozyajstve // Vestnik KrasGAU. 2023. № 1 (190). S. 54–62. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-1-54-62.
2. Opredelenie vysoty rastenij sel'skohozyajstvennykh kul'tur na osnove izmerenij bespilotnykh vozdushnykh sudov / N.O. Mal'chikov [i dr.] // Vestnik KrasGAU. 2020. № 12 (165). S. 46–53. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-12-46-53.
3. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multi-spectral and digital imagery / X. Zhou [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V.130. P. 246–255.
4. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction / A.A. Gitelson [et al.] // Remote Sens. Environ. 2002. V. 80. P. 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
5. Korrelyacionnye zavisimosti mezhdru vegetacionnymi indeksami, urozhaem zerna i opticheskimi harakteristikami list'ev pshenicy pri raznom soderzhanii v pochve azota i gустоте посева / V.P. Yakushev [i dr.] // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 2022. T. 57, № 1. S. 98–112. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
6. Illumination Geometry and Flying Height Influence Surface Reflectance and NDVI Derived from Multispectral UAS Imagery / D. Stow

- [et al.] // Drones. 2019. V. 3, P. 55. DOI: 10.3390/drones3030055.
7. Quantifying Efficacy and Limits of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology for Weed Seedling Detection as Affected by Sensor Resolution / J.M. Pena [et al.] // Sensors. 2015. V.15. P. 5609–5626. DOI: 10.3390/s150305609.

Статья принята к публикации 20.04.2024 / The article accepted for publication 20.04.2024.

Информация об авторах:

**Александр Андреевич Аюржанаев**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии, кандидат технических наук

**Юрий Михайлович Ильин**<sup>2</sup>, доцент кафедры мелиорации и охраны земель, кандидат сельскохозяйственных наук

**Батор Валерьевич Содномов**<sup>3</sup>, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии

**Маргарита Андреевна Жарникова**<sup>4</sup>, научный сотрудник лаборатории геоэкологии, кандидат географических наук

**Жаргалма Баторовна Алымбаева**<sup>5</sup>, научный сотрудник лаборатории геоэкологии, кандидат биологических наук

Information about the authors:

**Alexander Andreevich Ayurzhanayev**<sup>1</sup>, Senior Researcher, Laboratory of Geoecology, Candidate of Technical Sciences

**Yuri Mikhailovich Ilyin**<sup>2</sup>, Associate Professor at the Department of Land Reclamation and Conservation, Candidate of Agricultural Sciences

**Bator Valeryevich Sodnomov**<sup>3</sup>, Junior Researcher, Laboratory of Geoecology

**Margarita Andreevna Zharnikova**<sup>4</sup>, Researcher at the Laboratory of Geoecology, Candidate of Geographical Sciences

**Zhargalma Batorovna Alymbayeva**<sup>5</sup>, Researcher, Laboratory of Geoecology, Candidate of Biological Sciences

