

ГЕОГРАФИЯ

Геоэкология

Научная статья

УДК 631.4.

DOI 10.18101/2587-7143-2021-4-45-53

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЦВЕТНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ (ПО ДАННЫМ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ)

© **Аюржанаев Александр Андреевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии,
Байкальский институт природопользования СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
aaaayurzhanayev@yandex.ru

© **Алымбаева Жаргалма Баторовна**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории геоэкологии,
Байкальский институт природопользования СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
ajargalma2@yandex.ru

© **Жарникова Маргарита Андреевна**

кандидат географических наук, младший научный сотрудник
лаборатории геоэкологии,
Байкальский институт природопользования СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
zharnikova@binm.ru

© **Содномов Батор Валерьевич**

младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии,
Байкальский институт природопользования СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
sodnomov@binm.ru

Аннотация. Для рационального природопользования и устойчивого экономического развития показатели продуктивности являются одним из приоритетных в изучении степных экосистем. В статье представлены результаты оценки связи количества надземной фитомассы залежных и коренных степных сообществ Забайкалья с данными аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата, а также NDVI по снимкам спутников Terra и Aqua. Исследования проведены на двух ключевых участках модельного полигона в вегетационный период 2018 г. — всего выполнено 10 наблюдений, включающих учет фитомассы и съемку территории исследования. Выполнен расчет цветных вегетационных индексов ExG, ExR, ExGR, NDI, NDYI по ортофотопланам, полученным в результате обработки аэрофотоснимков. Корреляционный анализ выявил, что наилучшими индексами для оценки количества надземной фитомассы

являются ExR и ExGR. Высокую зависимость с продуктивностью проявил MODIS NDVI — коэффициент корреляции достигал значения 0,98. Наблюдается тесная связь фитомассы с гидротермическим коэффициентом — до 0,95. Обнаружено, что значения индексов на разных ключевых участках статистически не различимы. Сделан вывод о необходимости использования крупномасштабных карт растительности для оценки продуктивности степи с помощью цветных индексов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, гидротермический коэффициент, Забайкалье, залежь, корреляция, осадки, степные экосистемы, температура, укосы, фитомасса, цветные вегетационные индексы.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Государственного задания БИП СО РАН.

Для цитирования

О возможности оценки надземной фитомассы степной растительности с помощью цветных вегетационных индексов (по данным съемки с беспилотных систем) / А. А. Аюджанаев, Ж. Б. Алымбаева, М. А. Жарникова, Б. В. Содномов // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2021. № 4. С. 45–53.

Введение

Исследование продуктивности растительности является одним из приоритетных направлений для решения задач устойчивого экономического развития и рационального природопользования степных экосистем. Это необходимо для анализа состояния и мониторинга растительности, прогнозирования урожайности, а также используется в управлении водными ресурсами, оценке эффективности мероприятий по смягчению последствий засухи, разработке путей предотвращения деградации экосистем в условиях глобального изменения климата.

Традиционные методы измерения биомассы путем сбора, сушки и взвешивания растительности являются точными, но трудоемкими и требуют больших финансовых затрат при долгосрочных исследованиях. С развитием технических возможностей в качестве альтернативы традиционным наземным измерениям применяются методы, основанные на дистанционном зондировании. Эти методы приобрели популярность благодаря способности получать разновременную информацию о свойствах земного покрова в локальном, региональном и глобальном масштабе при относительно низких затратах [6, 7]. Однако спутниковые снимки дистанционного зондирования зачастую имеют низкое пространственное и временное разрешение, что сокращает точность извлечения информации о растительности с небольших площадей. Этим недостатком лишены данные, получаемые с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Распространенным, эффективным и простым способом автоматического извлечения информации о растительности из цифровых изображений является расчет вегетационных индексов (ВИ) [12]. Современные исследования, основанные на использовании ВИ БПЛА, продемонстрировали множество разнообразных приложений, например, таких как определение содержания хлорофилла и азота в злаках [9], выявление сорняков [14] и болезней растений [8], фиксация стадий роста зерновых культур [5], подсчет количества колосьев пшеницы [19], оценка плотности [10] и надземной биомассы растительности [4], прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур [14, 15, 18] и др.

В разных работах было предложено множество индексов растительности, которые используют как видимую (т. н. цветные или хроматические индексы), так и инфракрасную область электромагнитного спектра (спектральные индексы). Подавляющее большинство изысканий направлено на исследование сельскохозяйственных культур, среди них лишь в последние годы большее внимание уделяется цветным индексам, что, на наш взгляд, вызвано появлением на рынке бюджетных моделей БПЛА с RGB-камерами.

Цель работы — выявление взаимосвязи количества надземной фитомассы и цветных вегетационных индексов по данным аэрофотосъемки с БПЛА на примере степных растительных сообществ Забайкалья и сопоставление их со спутниковыми данными.

Материалы и методы

Объект исследования. Модельный полигон — гора Казачья (51°43' с. ш., 107°30' в. д.) — расположен на шлейфах отрогов хр. Цаган-Дабан на правом берегу р. Селенги. Район исследования приурочен к сухим дерновиннозлаковым степям. По физико-географическому районированию территория исследования относится к Селенгинско-Хилокской остепненно-среднегорной провинции Южно-Сибирской горной области [2], по ботанико-географическому — к Алтае-Саянской провинции Южно-Бурятского округа [3]. Для изучения сезонной динамики фитомассы степных сообществ на модельном полигоне выделено два ключевых участка. Участок № 1 характеризуется коренным сообществом — крыловоковыльной степью на склоне юго-западной экспозиции, высота 733 м (рис. 1а). Общее проективное покрытие (ОПП) травостоя в течение сезона изменяется от 40 до 65%. Участок № 2 расположен на долговременной залежи с мятликово-лапчатковой степью на склоне юго-восточной экспозиции, ОПП — 30–40 %, высота — 665 м (рис. 1б). Следует также отметить отличающийся мезорельеф участков. Коренные сообщества располагаются в привершинной части холма, тогда как залежи у подножия и имеют более равнинный характер.



Рис. 1. Ключевые участки территории исследования № 1 (а), № 2 (б)

Полевые и метеорологические данные. На этапе полевых исследований выполнены полные геоботанические описания растительности по общепринятой методике. Учет надземной фитомассы выполнен методом укусов в пределах каждого

ключевого участка на площадках с рандомизированным выбором размером 50x50 см (0,25 м²) в трехкратной повторности. Растения срезали на уровне поверхности почвы и взвешивали, при этом учитывалась только зеленая фитомасса. Одновременно осуществлялась аэрофотосъемка площадок с помощью беспилотного летательного аппарата с RGB-камерой. Всего за вегетационный период 2018 г. с мая по сентябрь выполнено 10 наблюдений.

Использованы данные температуры и осадков метеорологической станции Улан-Удэ для оценки влияния погодных условий на продуктивность растительности. Также с этой целью проведен расчет гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), характеризующего влагообеспеченность. ГТК вычисляется как отношение десятикратной суммы осадков в миллиметрах за период с температурами выше 10 °С к сумме температур в градусах за то же время:

$$\text{ГТК} = \Sigma P * 10 / \Sigma T_{>10},$$

где $T_{>10}$ — среднесуточная температура воздуха выше 10 °С и P — суточная сумма осадков в соответствующие сутки в мм. В данной работе ГТК рассчитан к каждой дате наблюдений.

Дистанционные данные. Аэрофотосъемка проведена с борта БПЛА DJI Mavic Pro, оборудованного 12-мегапиксельной RGB-камерой, с перекрытием снимков не менее 70 % и с высоты 500 м, что эквивалентно пространственному разрешению 28 см/пиксель. В программе обработки данных аэрофотосъемки Agisoft Photoscan получены ортофотопланы территории исследования. В результате их цифровой обработки вычислены значения 5 цветных ВИ (табл. 1).

Значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) рассчитаны по данным ежедневных спутниковых снимков MODIS TERRA с пространственным разрешением 250 м. Полученные значения использованы для создания на дату съемки БПЛА 7-дневных композитов NDVI с применением метода максимального значения MVC (Maximum Value Compositing). Для проведения сравнительного анализа рассчитаны средние значения цветных ВИ для областей, совпадающих с пикселями MODIS.

Таблица 1

Цветные вегетационные индексы, использованные в работе

Цветные индексы	Формула	Источник
Normalized difference index	$NDI = (G - R) / (G + R)$	(Woebbecke et al., 1995)
Excess red vegetation index	$ExR = 1.4 \times R - G$	(Meyer and Neto, 2008)
Excess green vegetation index	$ExG = 2 \times G - R - B$	(Woebbecke et al., 1995)
Excess green minus Excess red index	$ExGR = 3 \times G - 2,4 \times R - B$	(Meyer and Neto, 2008)
Normalized difference yellowness index	$NDYI = (G - B) / (G + B)$	(Sulik and Long, 2016)

Статистические расчеты. В виду малого количества наблюдений для определения связи фитомассы с вегетационными индексами и метеопараметрами использована ранговая корреляция Спирмена, которая применяется при отсутствии информации о распределении случайной величины. Для оценки различия количества надземной фитомассы и ВИ между ключевыми участками выбран непараметрический критерий Манна — Уитни, при этом принимается, что выборки

независимы, т. к. растительность на данных участках представлена разными сообществами.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлена динамика фитомассы на двух ключевых участках, а также сумма осадков между сроками наблюдения. В фенологическом ритме к началу лета разлагается основная часть подстилки, образовавшаяся в предшествующие годы и дающая питание для роста растений, происходит накопление почвенной влаги и положительных температур, вследствие чего наблюдается значительное нарастание зеленой массы. На участке № 1 29 мая фитомасса составила значение 141 г/м^2 , на участке № 2 — 66 г/м^2 . Далее темпы роста замедляются, поскольку устанавливается часто регистрируемая для исследуемой территории июньская засуха. В это время на фоне роста температуры воздуха и небольших осадков снижается активность жизнедеятельности микроорганизмов и беспозвоночных животных, что приводит к затормаживанию процессов разложения мертвых остатков, начинает ощущаться недостаток почвенной влаги, и как следствие, замедляется прирост зеленых частей растений. К 23 июля после выпадения значительного количества осадков активно развиваются доминанты сообществ и наблюдается возрастание фитомассы, ее наибольший запас приходится на 7 августа — 469 и 282 г/м^2 для первого и второго участка соответственно.

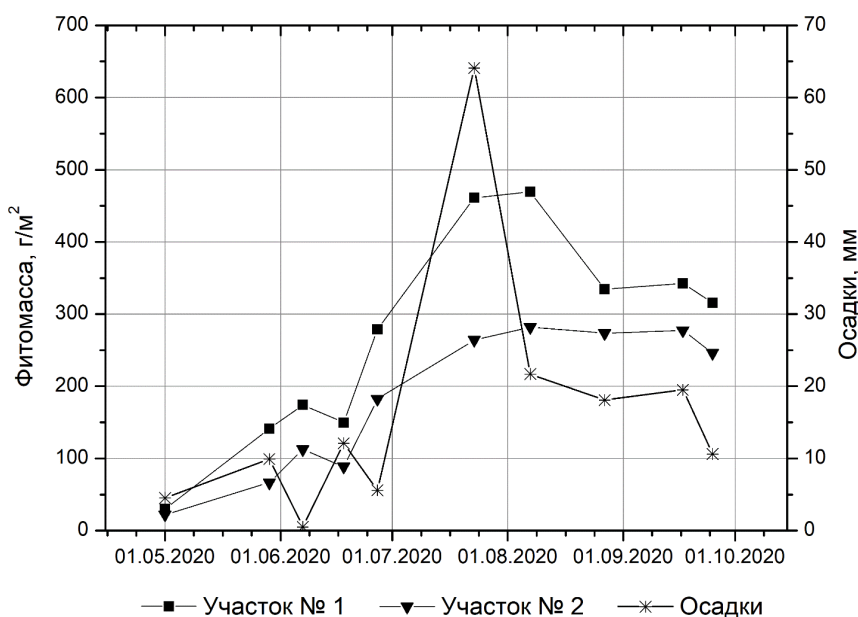


Рис. 2. Сезонная динамика осадков и фитомассы на ключевых участках

После достижения максимума надземной фитомассы в крыловоковыльной степи происходит ее спад до $316\text{--}343 \text{ г/м}^2$, тогда как для залежи наблюдается плато на уровне $246\text{--}277 \text{ г/м}^2$. Это различие вызвано тем, что на залежах видовой состав и структура ценоза остаются неизменными, что проявляется в постоянстве фитомассы — долговременная залежь, имея нарушенный баланс процессов гумифи-

кации и минерализации и находящаяся в переходной стадии от длиннокорневичной до луговой, является достаточно продуктивной в конце лета. Тогда как на участке № 1 снижение продуктивности во второй половине лета происходит вследствие замещения раннелетних видов, наступления у доминантов генеративной фазы, также появляются первые признаки отмирания растений — подготовка к периоду покоя. В целом для изучаемых сообществ характерна значительная сезонная изменчивость, которая проявляется в распределении видов по срокам развития на протяжении вегетационного периода, соответствующей смене аспектов, изменении структуры сообщества.

Помимо осадков одним из важнейших биоклиматических параметров, определяющих динамику продуктивности, является температура [1]. Коэффициенты корреляции фитомассы с температурой и накопленными осадками составили 0,51, 0,75 и 0,39, 0,89 соответственно для участка № 1 и 2. Корреляция с ГТК — показателем засушливости, который учитывает оба показателя, значительно выше, чем по отдельности с температурой и осадками (табл. 2).

Статистически значимые корреляции для обоих участков показывают индексы ExG, ExGR, ExR, NDI, за исключением последних двух ВИ, которые на втором участке показали низкие значения. В целом выявлено, что связь ВИ с укосами участка № 1 выше, чем для участка № 2, за исключением ExR. Из представленных показателей он имеет отрицательную связь с фитомассой, что обусловлено особенностью расчета данного индекса, который предназначен для отделения на снимке почвенного фона от зеленых растений. Наилучшими индексами для оценки количества надземной фитомассы являются ExR и ExGR — корреляция составила 0,78 для первого участка и 0,73, 0,75 для второго участка соответственно. Примечательно, что индекс NDI показал наибольшую связь с фитомассой участка № 1 — 0,88, тогда как для участка № 2 эта связь оказалась статистически незначимой. Вероятно, NDI является оптимальным индексом для степной растительности с высоким проективным покрытием.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции Спирмена фитомассы ключевых участков с вегетационными индексами и метеорологическими параметрами

	ExG	ExGR	ExR	NDI	CIVE	NDYI	NDVI	T	Осадки	ГТК
Участок № 1	0,78	0,78	-0,75	0,88	-0,38	0,48	0,98	0,58	0,77	0,95
Участок № 2	0,73	0,75	-0,27	0,30	-0,49	0,55	0,85	0,52	0,83	0,90

Сопоставление MODIS NDVI с надземной фитомассой показало их высокую связь — коэффициенты корреляции составили 0,98 и 0,85 для первого и второго участка соответственно. Статистически значимые корреляции NDVI с цветными индексами обнаружены для ExG, ExGR, ExR, NDI (участок № 1) и ExG, ExGR (участок № 2) — 0,70, 0,70, -0,64, 0,81 и 0,77, 0,87 соответственно. Таким образом, более высокую зависимость с продуктивностью степи проявил NDVI, которому присущи недостатки, свойственные спутниковым снимкам, — влияние облачности, низкое разрешение.

Тест Манна — Уитни показал, что различия в значениях как цветных индексов, так и NDVI между ключевыми участками статистически недостоверны, от-

существование различий также обнаружено и для фитомассы, однако в последнем случае, на наш взгляд, это вызвано небольшим числом наблюдений, поскольку уже при уровне 90 % различие становится значимым, чего не наблюдается для вегетационных индексов. Данный факт приводит к выводу, что при оценке продуктивности степи с использованием цветных ВИ необходимо проводить калибровку дистанционных данных с наземными измерениями наземной фитомассы для каждого ценоза в разные фенологические фазы. Для этих целей следует использовать актуальную крупномасштабную карту растительности исследуемой территории.

Заключение

Данные исследования показали, что наиболее тесная корреляция между запасами фитомассы и вегетационными индексами, рассчитанными по RGB-снимкам с борта БПЛА, выявлена для ExGR и ExG. Отмечено, что на коренных сообществах корреляционная связь выше, чем на долговременной залежи. Цветные вегетационные индексы при сопоставлении с наземными данными могут успешно применяться для оценки продуктивности степных экосистем. Направление дальнейших исследований связано с оценкой эффективности яркостной калибровки по эталонным панелям, увеличении ключевых участков, в том числе в различных по составу степных сообществах, а также оценке продуктивности по разновременным цифровым моделям местности, что в условиях естественной растительности может быть затруднительно из-за неоднородности вертикальной структуры фитоценозов.

Литература

1. Джапова Р. Р. Динамика растительного покрова Ергенинской возвышенности и Прикаспийской низменности в пределах Республики Калмыкия: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук: 03.00.05. Москва, 2007. 288 с.
2. Михеев В. С., Ряшин В. А. Ландшафты. Физико-географическое районирование // Атлас Забайкалья. Москва; Иркутск: ГУГК, 1967. С. 70–71.
3. Пешкова Г. А. Растительность Сибири (Предбайкалье и Забайкалье): Новосибирск: Наука, 1985. 145 с.
4. Brocks S., Bareth G. Estimating barley biomass with crop surface models from oblique RGB Imagery // Remote. Sens. 2018. Vol. 10. P. 268.
5. Phenological analysis of unmanned aerial vehicle based time series of barley imagery with high temporal resolution / A. Burkart, V. L. Hecht, T. Kraska, U. Rascher // Precision Agric. 2018. Vol. 19. P. 134–146.
6. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data / Claverie M., Demarez V., Duchemin B. [et al] // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 844–857.
7. Large-area hybrid estimation of aboveground biomass in interior Alaska using airborne laser scanning data / L. Ene, T. Gobakken, H. Andersen, E. Naeset [et al] // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 204. P. 741–755.
8. Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees / F. Garcia-Ruiz, S. Sankaran, J. M. Maja [et al] // Comput. Electron. Agric. 2013. Vol. 91. P. 106–115.
9. Programmable Aerial Multispectral Camera System for In-Season Crop Biomass and Nitrogen Content Estimation / J. Geipel, J. Link, J. A. Wirwahn [et al] // Agriculture. 2016. Vol. 6. P. 1–19.

10. Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery / X. Jin, S. Liu, F. Baret [et al] // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 198. P. 105–114.
11. Meyer G. E., Neto J. O. C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications // *Comput. Electron. Agric.* 2008. Vol. 63. P. 282–293.
12. Research on vegetation information extraction in the area of important buildings based on remote sensing image / G. Qiu, H. Yin, W. Xie [et al] // *Mol. Vis.* 2011. Vol. 18. P. 1395–1401.
13. Sulik J. J., Long D. S. Spectral considerations for modeling yield of canola // *Remote Sens. Environ.* 2016. Vol. 184. P. 161–174
14. Swain K. C., Thomson S. J., Jayasuriya H. P. W. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop // *Trans. ASABE*. 2010. Vol. 53. P. 21–27.
15. Tilly N., Aasen H., Bareth G. Fusion of plant height and vegetation indices for the estimation of barley biomass // *Remote Sens.* 2017. Vol. 7. P. 11449–11480.
16. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheatfields using images from UAV / J. Torres-Sanchez, J. M. Pena, A. I. de Castro [et al] // *Comput. Electron. Agric.* 2014. Vol. 103. P. 104–113.
17. Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions / D. M. Woebbecke, G. E. Meyer, K. Vonbargen [et al] // *Trans. ASAE*. 1995. Vol. 38. P. 259–269.
18. Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models / J. Yue, G. Yang, C. Li [et al] // *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. P. 708.
19. Recognition of Wheat Spike from Field Based Phenotype Platform Using Multi-Sensor Fusion and Improved Maximum Entropy Segmentation Algorithms / C. Zhou, D. Liang, X. Yang [et al] // *Remote. Sens.* 2018. Vol. 10. P. 246.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 08.11.2021; принята к публикации 06.12.2021.

ON THE POSSIBILITY OF ESTIMATING THE ABOVEGROUND PHYTOMASS
OF STEPPE VEGETATION USING COLOR VEGETATION INDICES
(BASED ON SURVEY DATA FROM UNMANNED SYSTEMS)

Aleksandr A. Ayurzhanayev

Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of Geocology Laboratory,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
aaayurzhanayev@yandex.ru

Zhargalma B. Alymbayeva

Cand. Sci. (Biol.), Researcher of Geocology Laboratory,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
ajargalma2@yandex.ru

Margarita A. Zharnikova

Cand. Sci. (Geogr.), Junior Researcher of Geoecology Laboratory,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
zharnikova@binm.ru

Bator V. Sodnomov

Junior Researcher of Geoecology Laboratory,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia
sodnomov@binm.ru

Abstract. Productivity indicators are one of the priorities in the study of steppe ecosystems, rational nature management and sustainable economic development. The article presents the results of assessment of the relationship between the amount of aboveground phytomass of fallow and indigenous steppe communities of Transbaikalia with aerial photography data from an unmanned aerial vehicle, as well as NDVI data from Terra and Aqua satellite images. The studies were carried out in two key areas of the model polygon during the growing season of 2018 — a total of 10 observations were made, including accounting for phytomass and survey of the study area. The calculation of color vegetation indices ExG, ExR, ExGR, NDI, NDYI was carried out according to orthomosaics obtained as a result of processing aerial imagery. Correlation analysis revealed that ExR and ExGR are the best indices for estimating the amount of aboveground phytomass. MODIS NDVI showed a high dependence on productivity — the correlation coefficient reached 0.98. There is a close correlation between the phytomass and the hydrothermal coefficient — up to 0.95. It was found that the values of the indices at different key areas are statistically not dissimilar. We have concluded that it is necessary to use large-scale vegetation maps to assess the productivity of the steppe using colored indices.

Key words: color vegetation indices, correlation, cuttings, hydrothermal coefficient, fallow, NDVI, phytomass, precipitation, steppe ecosystems, temperature, Transbaikalia, unmanned aerial vehicles.

Acknowledgments. The study is performed within the framework of the state assignment of Baikal Institute of Nature Management SB RAS.

For citation

Ayurzhanayev A. A., Alymbayeva Zh. B., Zharnikova M. A., Sodnomov B. V. On the Possibility of Estimating the Aboveground Phytomass of Steppe Vegetation Using Color Vegetation Indices (Based on Survey Data from Unmanned Systems). *Bulletin of Buryat State University. Biology, Geography*. 2021; 4: 45–53 (In Russ.).

The article was submitted 11.10.2021; approved after reviewing 08.11.2021; accepted for publication 06.12.2021.