

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ КУКУРУЗЫ НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ

*Серeda И.И.,  
Тутубалина О.В.*

**Резюме** – В работе рассматривается потенциал применения различных вегетационных индексов, рассчитанных по гиперспектральным снимкам, для оценки состояния посевов кукурузы. Проанализирована серия материалов воздушных съемок сельскохозяйственных полей в Краснодарском крае, Ставропольском крае, Курской и Липецкой областях гиперспектральной камерой Gamaya OXI VNIR-40. Эта камера позволяет получать снимки в 40 каналах в диапазоне от 450 до 900 нм. Для наземной валидации был произведен сбор фактических образцов различных гибридов кукурузы.

Показано, что значения коэффициента спектральной яркости для данной культуры изменяются закономерно и схожи как для южной, так и для центрально-черноземной агроклиматической зоны России. Выявлено, что для определения зеленой фитомассы и влагосодержания растений кукурузы целесообразно использовать различные вегетационные индексы в зависимости от стадии ее созревания.

**Ключевые слова** – гиперспектральные снимки, вегетационные индексы, точное земледелие, кукуруза.

## USE OF VEGETATION INDICES FOR ASSESSING THE STATE OF MAIZE CROPS ON THE BASIS OF AERIAL HYPERSPECTRAL IMAGERY

*Sereda I.I.,  
Tutubalina O.V.*

**Abstract** – We consider usefulness of vegetation indices for assessing the state of maize crops. The analysis is based on a series of aerial survey series of agricultural fields in Krasnodar, Stavropol, Kursk and Lipetsk regions of Russia with Gamaya OXI VNIR-40 hyperspectral camera. This camera images 40 channels in the range from 450 to 900 nm. For validating remotely sensed data, samples of various hybrids of maize were collected in the fields.

We demonstrate that the values of the spectral reflectance for this crop change regularly and the same way for the south and central climatic zones of European Russia. It was found that for determining the green phytomass and the moisture content of maize plants it is expedient to use different vegetation indices, depending on the stage of crop maturation.

**Keywords** – hyperspectral images, vegetation indices, precision agriculture, maize.

## Введение

Развитие сельского хозяйства всегда являлось стратегической задачей для большинства стран мира. От состояния данной отрасли зависит благополучие стран в целом. Поэтому сейчас активно развиваются технологии и способы выращивания сельскохозяйственных культур. Одним из новых подходов является точное земледелие, получившее развитие в США, Канаде и странах Европы, и набирающее популярность в России.

Точное земледелие – это совокупность технологий, технических средств и систем принятия решений, направленных на управление параметрами плодородия, влияющими на рост растений. В основе принципа точного земледелия лежит понятие о неоднородности особенностей произрастания растений в пределах поля, его мозаичности. В связи с этим на каждом отдельном небольшом участке проводятся различные мелиоративные работы, включающие дозы внесения удобрений, известкование и др. [2].

Применение гиперспектральных камер в данной отрасли активно развивается. В 2016 году у авторского коллектива появилась возможность изучить состояние посевов кукурузы по полевым и авиационным гиперспектральным данным на примере четырех полей, расположенных в разных агроклиматических условиях: Краснодарском и Ставропольском крае, а также в Курской и Липецкой области. Исследования на полях проводились 2–3 раза за сезон, что позволило наблюдать характеристики растительности в динамике.

По полученным данным выполнена оценка потенциала гиперспектральной съемки для определения характеристик кукурузы в разных природных условиях и регионах на разных стадиях ее созревания.

## Исходные данные и методы

Исследование проводилось на полях кукурузы компании Syngenta, занимающейся продажей семян культурных растений, а также разработкой средств их защиты [6]. Всего было рассмотрено четыре поля, расположенных в Краснодарском крае, Ставропольском крае, Курской области и Липецкой области. Это позволяет оценивать состояние посевов в различных агроклиматических условиях.

Различные гибриды кукурузы засевались на четырех указанных полях узкими длинными рядами по 6–8 рядов одного сорта и плотности засева.

На территории исследования производилась съемка гиперспектральной камерой Gamma OXI VNIR-40, установленной на борту беспилотного летательного аппарата «Геоскан 201 Агро». Она состоит из совмещенных камер OXIVis-16 и OXI NIR-25. Спектральный охват первой – 450–630 нм (16 каналов), второй – 600–950 нм (25 каналов). Один из каналов с центром на 625 нм. дублируется для двух камер, что позволяет контролировать их взаимную радиометрическую калибровку. Камера, которая была использована в данном исследовании, имела спектральный охват каналов от 450 до 904 нм. [4].

Для каждого из исследуемых полей даты съемок были приурочены к определенному периоду созревания кукурузы: первая съемка – опыление початков, вторая съемка – молочная зрелость [3]. Конкретные даты съемок представлены в таблице 1.

Для гибридов Фалькон, Вералия, Гитаго и Феномен также были собраны полевые образцы и получены биофизические данные о растениях, которые включали в себя

оценку фитомассы и влагосодержания листьев, стеблей и соцветий кукурузы. Отдельно измерялись густота, толщина и высота растений.

В Краснодарском крае была произведена дополнительная съемка 29 июня 2016 года на стадии цветения кукурузы. Сбор полевых образцов при этом не производился.

Таблица 1.

Даты проведения съемок гиперспектральной камерой Gamaua OXI VNIR-40 и наземных измерений на полях кукурузы.

| Регион              | Съемка 1<br>(опыление початков) | Съемка 2<br>(молочная зрелость) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Краснодарский край  | 17.07.2016                      | 31.07.2016                      |
| Ставропольский край | 16.07.2016                      | 30.07.2016                      |
| Курская область     | 06.08.2016                      | 30.08.2016                      |
| Липецкая область    | 07.08.2016                      | 29.08.2016                      |

Съемка выполнялась в дни со стабильным освещением, в период с 11 до 16 часов по местному времени. При этом она производилась не одновременно на всем поле, а состояла из сотен перекрывающихся кадров. При последующей обработке по наборам кадров создавались ортофотопланы в программе Agisoft PhotoScan.

Радиометрическая обработка ортофотопланов производилась в программе Sprocket, разработанной фирмой Gamaua. Полученные коэффициенты спектральной яркости снимков приводились к реальным значениям. Это операция была возможна, так как на всех ортофотопланах присутствовали эталонные площадки с известными значениями коэффициента спектральной яркости (КСЯ). В качестве подобных площадок выбирались участки открытой почвы или дорожное покрытие, так как они наиболее однородны по спектру. Размер площадок составлял около 30 м<sup>2</sup>. Значения КСЯ на них измерялись с помощью наземных спектрорадиометров ASD FieldSpec 3 Hi-Res, USB2000+ OceanOptics и FLAME OceanOptics, которые были калиброваны относительно эталонной панели с известной отражательной способностью 95%.

Поскольку было известно расположение гибридов кукурузы на полях, то, извлекая значения КСЯ для пикселей ортофотоплана, мы составили графики средних значений КСЯ для каждого из них. Снимки на поля кукурузы были получены за несколько дат и на разных стадиях созревания культуры, что позволило сравнить характер кривых КСЯ в динамике. Более того, так как имелись фактические данные о зеленой фитомассе растений и о ее влагосодержании, появилась возможность оценить эффективность специализированных вегетационных индексов, разработанных для гиперспектральных снимков, для дистанционного получения этих параметров.

На основании анализа научных источников [5, 7], были выбраны вегетационные индексы, предназначенные для оценки влагосодержания и величины зеленой фитомассы растений. При этом было выявлено, что специализированных индексов именно для кукурузы не существует. Кроме того, поскольку в дальнейшем планируется сравнивать величины вегетационных индексов по данным Gamaua OXI VNIR-40 и космической съемочной системы Sentinel-2 MSI, то предпочтение отдавалось индексам, применимым для обеих систем. В результате, были выбраны следующие индексы: для оценки влагосодержания – NDWI, DSWI4, SIPI, IRECI, EVI; для оценки величины зеленой фитомассы NDVI, MSR, GNDVI, MCARI, MTCI, TCARI/OSAVI (рис. 1).

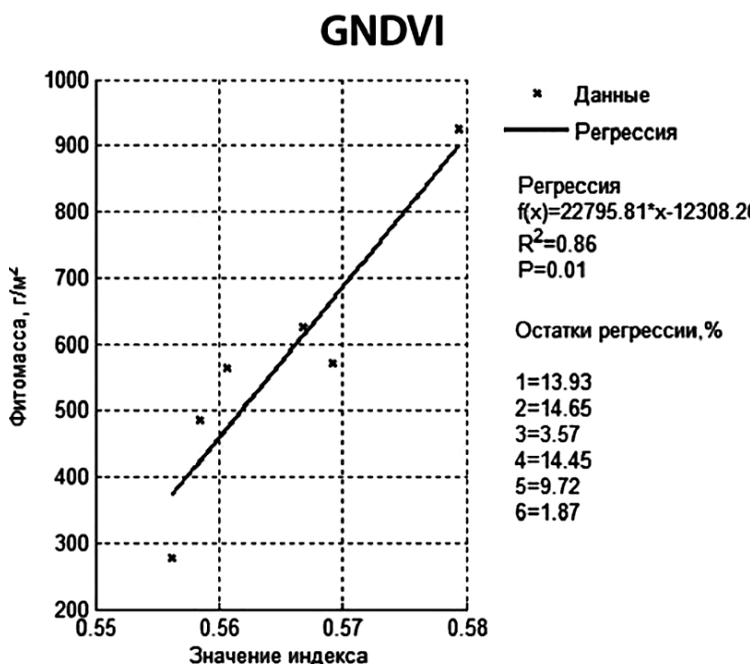
| Название  | Формула   |
|---|---|
| Normalized Difference Water Index   | $NDWI = \frac{(R842 - R560)}{(R840 - R560)}$  |
| Disease water stress index  | $DSWI4 = \frac{R550}{R680}$   |
| Structure Insensitive Pigment Index   | $SIPI = \frac{R842 - R470}{R842 - R705}$  |
| Inverted Red-Edge Chlorophyll Index   | $IRECI = \frac{R783 - R665}{(R842 + 6 * R665 - 7,5 * R490 + 1)}$  |
| Enhanced Vegetation Index   | $EVI = 2,5 * \frac{R842 - R665}{(R842 + 6 * R665 - 7,5 * R490 + 1)}$  |
| Normalized Difference Vegetation Index  | $NDVI_{705, 750} = \frac{R750 - R705}{R750 + R705}$   |
| Modified Simple Ratio   | $MSR = \frac{\frac{R750}{R705} - 1}{\sqrt{\left(\frac{R750}{R705}\right) + 1}}$   |
| Green Normalized Difference Vegetation Index  | $GNDVI = \frac{R750 - R550}{R750 + R550}$   |
| Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index   | $MCARI = [(R700 - R670) - 0.2 * (R700 - R550)] * \frac{R700}{R670}$   |
| MERIS Terrestrial Chlorophyll Index   | $MTCI = \frac{R760 - R720}{R720 - R670}$  |
| Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index / Optimized Soil Adjusted Vegetation Index | $\frac{TCARI}{OSAVI} = \frac{3 * \left[ (R750 - R705) - 0,2 * (R750 - R550) * \left( \frac{R750}{R705} \right) \right]}{1,16 * \frac{R750 - R705}{R750 + R705 + 0,16}}$ |

**Рис. 1.** Формулы вегетационных индексов, используемых в работе

Рассчитанные величины индексов использовались для проведения линейного регрессионного анализа с полученными фактическими наземными данными. При этом среднее значение каждого из перечисленных индексов по всей полосе произрастания гибрида сравнивалось с определенными в лаборатории значениями для образцов растений с тех же участков.

При проведении регрессионного анализа также были получены формулы пересчета индексной меры показателя в ее физическое значение, а также статистически оценивалось качество полученной зависимости с использованием коэффициента детерминации  $R^2$ ,  $P$ -значений и остатков регрессий. Эти расчеты производились в программной

среде Matlab на основе программного кода А. А. Деркачевой [1], модифицированного для данного исследования. Результаты регрессионного анализа были визуализированы в виде графиков, где по оси абсцисс располагались значения индексов, а по оси ординат – значения показателей (рис. 2).



**Рис. 2.** График результатов регрессионного анализа для кукурузного поля в Краснодарском крае по результатам работ 17.07.2017.

Минимальные остатки регрессии (не более 30% от диапазона значений параметра) являлись главным статистическим показателем оценки качества работы индекса.

## Результаты исследования

Сезонная динамика КСЯ. Графики средних значений КСЯ для каждого из гибридов кукурузы на поле в Краснодарском крае, представлены на рисунке 3.

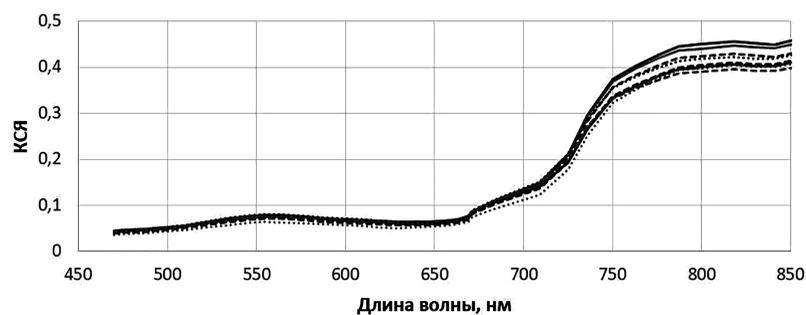
**Таблица 2.**

Остатки регрессионного анализа для кукурузного поля в Краснодарском крае, % от диапазона значений. Индексы влагосодержания.

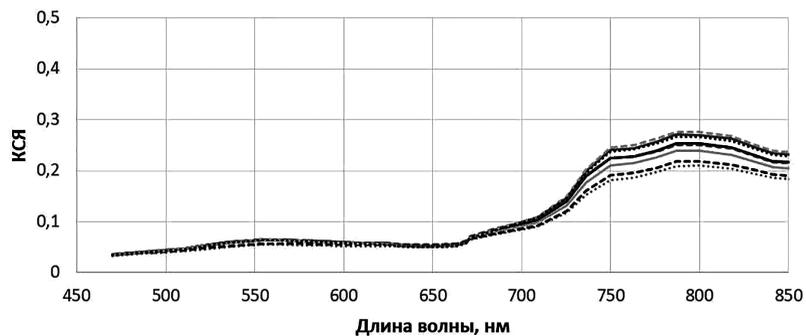
| Гибриды (тыс.шт./га) | Индексы влагосодержания |      |      |       |      |
|----------------------|-------------------------|------|------|-------|------|
|                      | DSWI4                   | NDWI | SIPI | IRECI | EVI  |
| <i>17.07.2016</i>    |                         |      |      |       |      |
| Вералия (85)         | 4,4                     | 12,0 | 7,4  | 12,4  | 14,0 |
| Вералия (55)         | 4,3                     | 21,9 | 19,0 | 21,4  | 21,2 |
| Феномен (85)         | 57,1                    | 17,2 | 56,1 | 23,5  | 19,5 |
| Феномен (55)         | 24,1                    | 24,1 | 25,4 | 21,9  | 25,3 |
| Гитаго (55)          | 37,4                    | 1,3  | 13,2 | 38,1  | 30,4 |
| Гитаго (85)          | 4,3                     | 1,8  | 8,9  | 2,6   | 1,0  |

| 31.07.2016   |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|
| Вералия (85) | 1,6  | 38,0 | 43,8 | 43,0 | 33,8 |
| Вералия (55) | 13,9 | 4,7  | 29,8 | 5,1  | 9,1  |
| Феномен (85) | 23,3 | 24,7 | 6,2  | 16,3 | 26,1 |
| Феномен (55) | 15,6 | 42,6 | 31,8 | 48,0 | 45,0 |
| Гитаго (55)  | 5,4  | 0,7  | 39,5 | 35,8 | 34,6 |
| Гитаго (85)  | 13,3 | 34,7 | 4,0  | 30,5 | 28,7 |

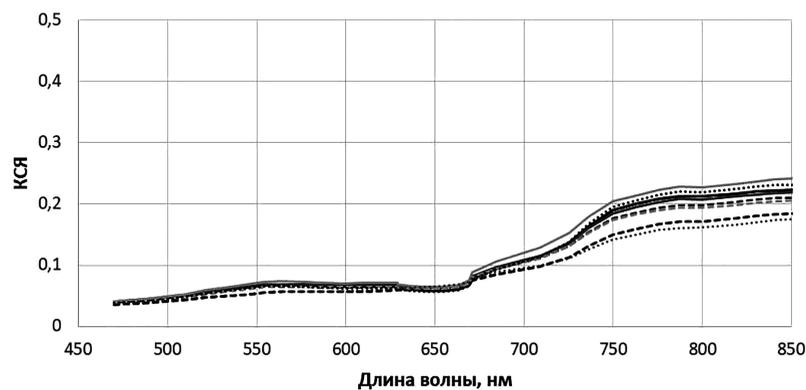
29.06.2016



17.07.2016



31.07.2016



— Физик                      — Гибрид хозяйства 1      — Гибрид хозяйства 2  
 - - - - - Люциус                - - - - - НК Термо (станд)    - - - - - Отечественный 1  
 ..... Отечественный 2      ..... СИ Ариосо

Рис. 3. Графики средних значений КСЯ для каждого из гибридов кукурузы на поле в Краснодарском крае

Таблица 3.

Остатки регрессионного анализа для кукурузного поля в Краснодарском крае, %.  
Индексы зеленой фитомассы растений.

| Гибриды (тыс.шт./га) | Индексы величины зеленой фитомассы |             |             |             |             |             |
|----------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                      | NDVI                               | GNDVI       | MSR         | MTCI        | MCARI       | TSARI/OSAVI |
| <i>17.07.2016</i>    |                                    |             |             |             |             |             |
| Вералия (85)         | 23,2                               | <b>13,9</b> | 22,6        | <b>0,7</b>  | 27,2        | <b>12,1</b> |
| Вералия (55)         | 32,6                               | <b>14,7</b> | 39,2        | <b>9,5</b>  | 27,4        | 27,5        |
| Феномен (85)         | <b>17,8</b>                        | <b>3,6</b>  | 26,7        | 34,1        | <b>14,2</b> | 38,7        |
| Феномен (55)         | 20,2                               | <b>14,5</b> | 20,6        | <b>16,8</b> | <b>17,9</b> | <b>5,3</b>  |
| Гитаго (55)          | <b>5,8</b>                         | <b>9,7</b>  | <b>1,0</b>  | 30,7        | <b>5,9</b>  | 37,6        |
| Гитаго (85)          | <b>5,8</b>                         | <b>1,9</b>  | <b>9,5</b>  | <b>11,4</b> | <b>9,8</b>  | <b>9,1</b>  |
| <i>31.07.2016</i>    |                                    |             |             |             |             |             |
| Вералия (85)         | <b>14,8</b>                        | <b>4,0</b>  | <b>18,4</b> | <b>1,7</b>  | <b>12,1</b> | <b>9,1</b>  |
| Вералия (55)         | 25,4                               | 29,5        | 26,1        | 41,8        | 26,0        | 27,3        |
| Феномен (85)         | 25,3                               | <b>13,7</b> | 26,5        | <b>8,0</b>  | 23,7        | <b>19,3</b> |
| Феномен (55)         | 65,2                               | 70,6        | 61,7        | 63,6        | 67,0        | 69,0        |
| Гитаго (55)          | 24,8                               | 23,7        | 25,8        | <b>19,8</b> | 24,4        | 24,8        |
| Гитаго (85)          | <b>4,6</b>                         | <b>7,7</b>  | <b>1,7</b>  | <b>4,3</b>  | <b>5,0</b>  | <b>6,7</b>  |

Для поля в Краснодарском крае, наиболее информативным индексом влагосодержания в середине июля является NDWI (максимальный остаток 24,1%). В конце июля этим индексом является DSWI4 (максимальный остаток 23,3%). Наиболее информативным индексом зеленой фитомассы, то для середины июля является GNDVI (максимальный остаток 14,7%) и чуть хуже MCARI (максимальный остаток 27,4%). Для конца июля все индексы становятся менее информативными, и выбрать из них лучший затруднительно, так как общий уровень влагосодержания растений к концу сезона снизился на 30–40% относительно более ранних измерений.

По оценке остатков регрессии в Курской области 06.08.2016 г. индекс влагосодержания DSWI4 показывает наиболее точные значения (максимальный остаток 19,1%). Среди индексов зеленой фитомассы сложно выделить лучший, так как они показывают достаточно низкие результаты (максимальные остатки 45–60%). По исследованиям 30.08.2016 можно выделить индексы DSWI4 и MTCI, так как они содержат наименьшее количество остатков, превышающих значение 30%.

## Выводы

Исследование показало, что применяемый метод сбора фактических полевых данных влагосодержания и зеленой фитомассы растений, является неэффективным и недостаточно достоверным и требует исправления. Судя по полученным данным, большинство максимальных остатков, полученных при проведении линейного регрес-

сионного анализа между фактическими данными и данными по снимкам, стали результатами погрешностей сбора.

Тем не менее, регрессионный анализ смог выявить некоторые закономерности, характерные для полей кукурузы. Наиболее информативным индексом для определения влагосодержания является *DSWI4*. В числе лучших также находятся индексы *NDWI* и *EVI*. Среди индексов содержания зеленой фитомассы в растительности однозначно наиболее информативного выявить не удалось. Тем не менее, данные на основе индексов *GNDVI*, *MTCI*, *MCARI* показали хорошие результаты. В целом, индексы влагосодержания показывали более хорошие результаты на более поздних стадиях созревания кукурузы, а индексы зеленой фитомассы на более ранних стадиях созревания кукурузы.

Кривые *КСЯ* гибридов кукурузы показали, что их изменения закономерны в течение времени для всех исследуемых регионов.

В дальнейшем планируется провести ряд дополнительных исследований на полях кукурузы с учетом накопленного опыта. Также планируется рассмотреть возможность определить проективное покрытие растительности на примере кукурузы с использованием воздушной гиперспектральной съемки. Кроме того, при условии достаточного количества данных, планируется создание синтетических индексов, описывающих характеристики кукурузы на определенных стадиях ее созревания наиболее информативно. В ходе работ также был собран ряд дополнительных данных: характеристики початков, объем собранного урожая по гибридам. В дальнейшем предполагается оценить связь этих показателей со спектральными характеристиками растений на различных стадиях роста.

## Литература

- [1] *Деркачева А. А.* Применение гиперспектральных снимков и наземных данных для оценки состояния сельскохозяйственных культур [Текст]: дипломная работа / МГУ имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра картографии и геоинформатики. – 2015. 87 с.
- [2] Технологии точного земледелия, их перспективы и возможности использования на мелиоративных землях [Электронный ресурс]: Веб-сайт Сельское хозяйство: агрономия, земледелие, овощеводство – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://selo-delo.ru/zemledelie/29-tochechnoe-zemledelie?showall=1&limitstart/>, свободный. (Дата обращения: 05.05.2015 г.)
- [3] *Шиндин А. П., Багринцева В. Н., Борщ Т. И., Горбачева А. Г., Сотченко В. С., Сотченко Е. Ф., Сотченко Ю. В.* Кукуруза. Современная технология возделывания. Москва: РосАгроХим, 2009 – 127 с.
- [4] *GamayaOXI* [Электронный ресурс]: Веб-сайт Gamaya. Режим доступа <https://www.gamaya.com/>, свободный. (Дата обращения: 16.10.2016г.)
- [5] *Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M., Landry J. A., Bonnell R. B., Viau A. A.* Classification of hyperspectral data by decision trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn // *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, №39, p.67–93.
- [6] Syngenta Россия [Электронный ресурс]: Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <https://www.syngenta.ru/about-us>, свободный. (Дата обращения 25.04.2017 г.).
- [7] *Wu Q., Wang J., Wang Ch., Xu T.* Study on the optimal algorithm prediction of corn component information based on hyperspectral imaging // *Infrared Physics & Technology*, 2016 №78, С.66–71.

## References

- [1] *Derkacheva A. A.* Primenenie giperspektralnykh snimkov i nazemnykh dannykh dlya ocenki sostoyaniya selskoxozyajstvennykh kultur [Tekst]: diplomnaya rabota / MGU imeni M.V. Lomonosova, geograficheskij f-t, kafedra kartografii i geoinformatiki. – 2015. 87 p.
- [2] *Technologii tochnogo zemledeliya, ix perspektivy i vozmozhnosti ispolzovaniya na meliorativnykh zemlyakh* [Elektronnyj resurs]: Veb-sajt Selskoe xozyajstvo: agronomiya, zemledelie, ovoshhevodstvo – Elektron.

tekstovye dan. Rezhim dostupa: <http://selo-delo.ru/zemledelie/29-tochechnoe-zemledelie?showall=1&limitstart/>, svobodnyj. (Data obrashheniya: 05.05.2015 g.)

- [3] *Shindin A. P., Bagrinceva V. N., Borshh T. I., Gorbacheva A. G., Sotchenko V. S., Sotchenko E. F., Sotchenko Yu. V.* Kukuruz. Sovremennaya tekhnologiya vozdeliyaniya. Moskva: RosAgroXim, 2009 – 127 p.
- [4] GamayaOXI [Elektronnyj resurs]: Veb-sajt Gamaya. Rezhim dostupa <https://www.gamaya.com/>, svobodnyj. (Data obrashheniya: 16.10.2016g.)
- [5] *Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M., Landry J. A., Bonnell R. B., Viau A. A.* Classification of hyperspectral data by decision trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn // Computers and Electronics in Agriculture, 2003, №39, p.67–93.
- [6] Syngenta Rossiya [Elektronnyj resurs]: Elektron. tekstovye dan. Rezhim dostupa: <https://www.syngenta.ru/about-us>, svobodnyj. (Data obrashheniya 25.04.2017 g.)
- [7] *Wu Q., Wang J., Wang Ch., Xu T.* Study on the optimal algorithm prediction of corn component information based on hyperspectral imaging // Infrared Physics & Technology 2016, №78, С.66–71.

### Авторы

*Середа И. И.* – бакалавр географии по специальности картография и геоинформатика, магистрант 2-го года обучения.

*Тутубалина О. В.* – ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики, кандидат географических наук, Doctor of Philosophy.

### Authors

*Sereda I. I.* – Bachelor of Geography in the specialty of cartography and geoinformatics, Master of 2-nd year.

*Tutubalina O. V.* – Leading Scientist of the Department of Cartography and Geoinformatics, Candidate of Geographical Sciences, Doctor of Philosophy.