

of high yields]. *Fotosintez i voprosy produktivnosti rasteniy* [Photosynthesis and plant productivity issues], Moscow, AS SSSR Publ. House, 1963, pp. 37–70.

17. Filin V. I. *Biologicheskie i tekhnologicheskie osnovy programmirovannogo vozdeystviya selskokhozyaystvennykh kultur pri oroshenii v zone sukhikh stepey Nizhnego Povolzhya* [The biological and technological foundations of the programmed cultivation of agricultural crops under irrigation in the dry steppe zone of the Lower Volga Region], Volgograd, 1987, 49 p.

18. Filin V. I. *Teoriya programmirovaniya urozhaya v prilozhenii k sovremennomu zemledeliyu* [Theory of crop programming in the application to modern agriculture]. *Uchenye zapiski agronomicheskogo fakulteta VGSKhA* [Proceedings of the Agronomical Faculty of the Vyatka State Agricultural Academy], Volgograd, VGSKhA Publ. House. 2005, pp. 97–122.

19. Shatilov I. S., Chudnovskiy A. F. *Agrofizicheskie, agrometeorologicheskie i agrotekhnicheskie osnovy programmirovaniya urozhaya (printsipy ASU TP v zemledelii)* [Agrophysical, agrometeorological and agrotechnical bases of crop programming (principles of automated process control system in agriculture)], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980, 320 p.

20. Shatilov I. S. *Printsipy programmirovaniya urozhaynosti* [The principles of productivity programming]. *Vestnik s.-h. nauk* [Bulletin of the Agricultural Sciences], 1973, no. 3, pp. 8–14.

### ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОПУСТЫНИВАНИЯ И ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ СЕВЕРНОГО ПРИКАСПИЯ

**Шабанов Дмитрий Иванович**, кандидат географических наук, Астраханский государственный университет, 414000, Российская Федерация, г. Астрахань, пл. Шаумяна, 1, e-mail: mettus@mail.ru

В статье описаны некоторые подходы к использованию гиперспектральной информации полученной методами дистанционного зондирования Земли для оценки процессов опустынивания и деградации земель. Работа выполнялась на основе сцены сенсора EO-1 Hyperion в районе Астраханского газоконденсатного месторождения. Были проведены расчеты нескольких узкополосных индексов вегетации и комбинирование их в единое изображение. Полученное композитное изображение позволяет выделить градации состояния вегетации, оценить территориальную структуру растительного покрова и выделить участки с отсутствием вегетации (в том числе деградированные и опустыненные). На территории, где Enhanced Vegetation Index имел значения, характерные для деградации, разреженного покрова, накопления мертвой биомассы классификация «без эталонов», позволила выделить четыре степени деградации территории.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, опустынивание, гиперспектральные данные, деградация ландшафтов, анализ вегетации, Северный Прикаспий, EO-1 Hyperion, индексы вегетации, классификация

### USE OF REMOTE SENSED HYPERSECTRAL DATA FOR LAND DEGRADATION ASSESSMENT OF NORTH CASPIAN SEA REGION

**Shabanov Dmitriy I.**, C.Sc. in Geography, Astrakhan State University, 1 Shaumyan sq., Astrakhan, 414000, Russian Federation, e-mail mettus@mail.ru

The article describes some approaches to the use of hyperspectral information obtained by remote sensing methods of the Earth to assess the processes of desertification and land degradation. The work was performed using EO-1 Hyperion sensor scene in the Astrakhan gas condensate field area. A set of narrowband vegetation indices were calculated

and combined into a single image. The resulting composite image allows to distinguish the gradations of the vegetation health and assess the territorial structure of the land cover, and to identify areas with a lack of vegetation (including degraded and deserted ones). On the territory where the Enhanced Vegetation Index had the "bad" values unsupervised classification allowed to identify 4 more grades of land degradation.

**Keywords:** EO-1 Hyperion, land degradation, remote sensing, desertification, hyperspectral remote sensing data, Northern Caspian Region, vegetation analysis, drylands, vegetation indices

Hyperion Imaging Spectrometer был одним из трех инструментов спутника Earth Orbiter-1 (EO-1), запущенного на орбиту для отработки новых технологий дистанционного зондирования. EO-1 следовал по орбите за спутником Landsat-7 с отставанием менее 1 мин, что позволяло получать их данные практически синхронно. Спутник EO-1 успешно функционировал с 2000 по 2016 г., после чего был штатно выведен из эксплуатации в конце января 2017 г. Архив космических данных продолжает оставаться доступным через онлайн-системы получения снимков. Основным отличием гиперспектральной информации является большое количество спектральных каналов небольшой ширины, следующих последовательно друг за другом. Например, у сенсора Hyperion таких каналов 220. Они следуют друг за другом с шагом 10 нанометров и покрывают диапазон от 0,4 до 2,5 мк. Пространственное разрешение составляет 30 м. Ширина полосы захвата составляет 7,5 км, а длина – до 100 км [14, 13, 21]. Такие характеристики потенциально позволяют получать более детальную и точную информацию о вегетирующей и невегетирующей растительности, почвенном покрове, чем полученная по анализу мультиспектральных данных (например, Landsat-8 OLI). С другой стороны, мультиспектральные данные доступны и позволяют иметь регулярное сплошное покрытие территории на глубину порядка 40 лет, в отличие от гиперспектральных (только отдельные сцены). Также гиперспектральные данные для раскрытия их потенциала требуют применения спектральных методов классификаций, таких как Linear Spectral Unmixing или Spectral Angle. Они более сложны в использовании и интерпретации и требуют использования библиотек спектральных образов.

В прошедшем десятилетии Hyperion был единственным гиперспектральным сенсором космического базирования. В настоящий момент функционирует отечественная гиперспектральная аппаратура на спутнике Ресурс-П (ГСА), также распространяются гиперспектральные камеры для малых и средних беспилотных летательных аппаратов. Это определяет актуальность вопроса изучения методов применения гиперспектральной информации (в том числе) для оценки процессов опустынивания и деградации земель. Регион Северного Прикаспия занимает Астраханскую область, Республику Калмыкия (Россия) и Атыраускую область (Казахстан). Астраханская область занимает центрально-северо-западную часть региона. В ней располагаются такие уникальные природные объекты, как Волго-Ахтубинская пойма, дельта р. Волги и зона западных подстепных ильменей, которые имеют высокое культурное, социо-экономическое значение для населения России, а также чрезвычайно важны для поддержания биоразнообразия. Климат территории континентальный, засушливый. Характерно развитие процессов опустынивания и деградации земель, антропогенного и природного генеза [1–3]. Для изучения вопроса

применения гиперспектральных данных была произведена оценка имеющегося фонда снимков EO-1 Nuregion, доступных для использования, на предмет качества, сезонности и покрытия территории Северного Прикаспия. Доступ к архиву производился через сервис EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Поиск в системе показал наличие пяти сцен с облачностью менее 10 %, которые локализовались на территории Астраханской области. Для работы были выбраны две сцены от 18 сентября и 17 августа 2004 г. (рис. 1).

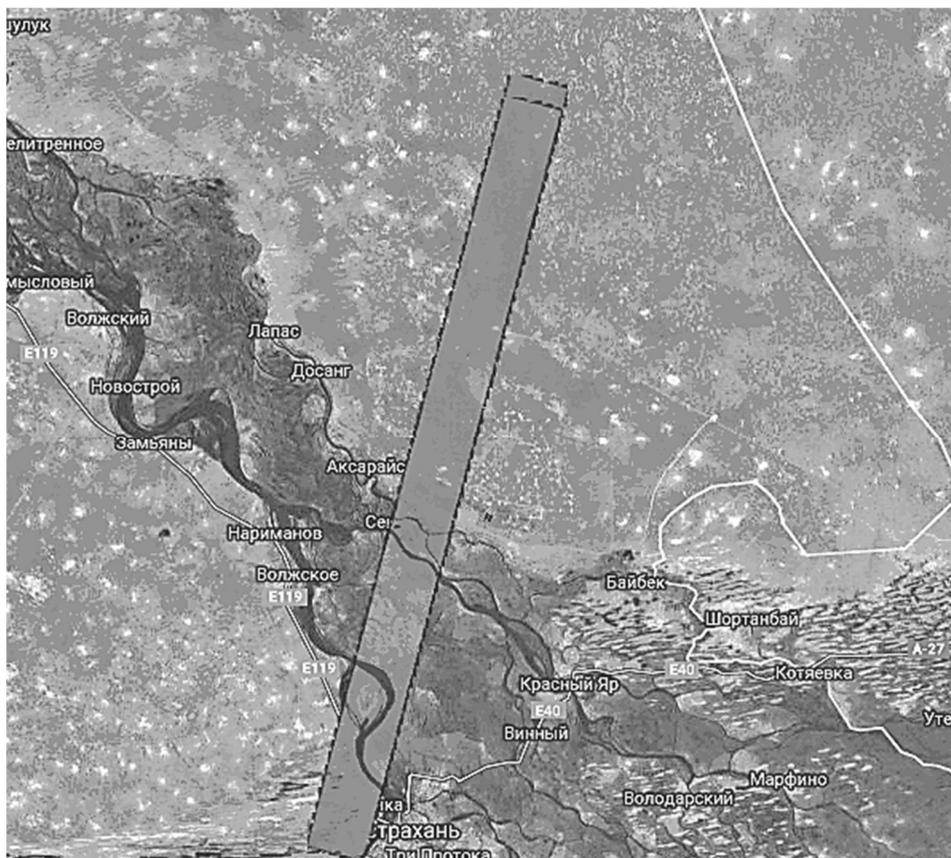


Рис. 1. Местоположение и территориальный охват сцен Nuregion

В программном комплексе ENVI была проведена радиометрическая и атмосферная калибровка снимков, после чего начаты работы по дешифрированию. На рисунке 2 представлен участок с разрушенным растительным покровом и участками полужакопленных песков и его спектральный профиль. На рисунке 3 – участок пустынного ландшафта с разреженным растительным покровом и его спектральный профиль.

Одним из способов оценки деградации ландшафта и его текущего состояния предоставляется расчет производных индексов, дающих представление о состоянии и пространственном распределении почвы, растительности и их параметров (самым известным из которых является NDVI – Normalized Difference Vegetation Index [18]). Большое количество узких спектральных диапазонов позволяет в полной мере использовать знания об особенностях спектрального отражения и поглощения различных пигментов растения и его внутренних структур, которые накоплены при лабораторном изучении растений.

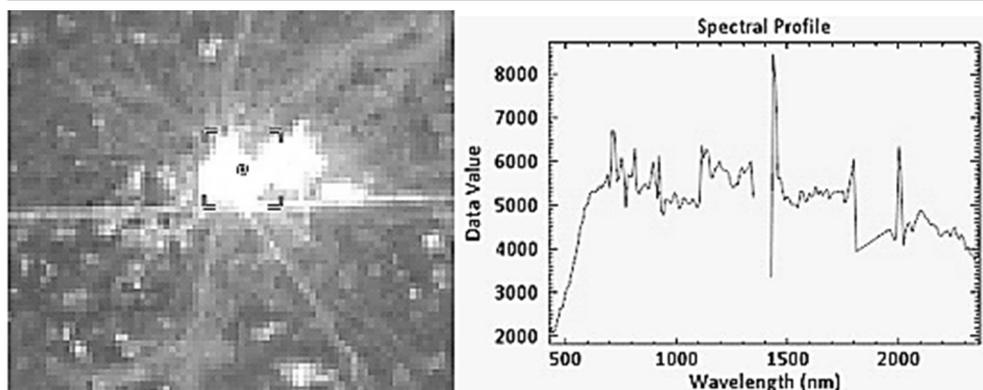


Рис. 2. Опустыненный участок и его спектральный профиль

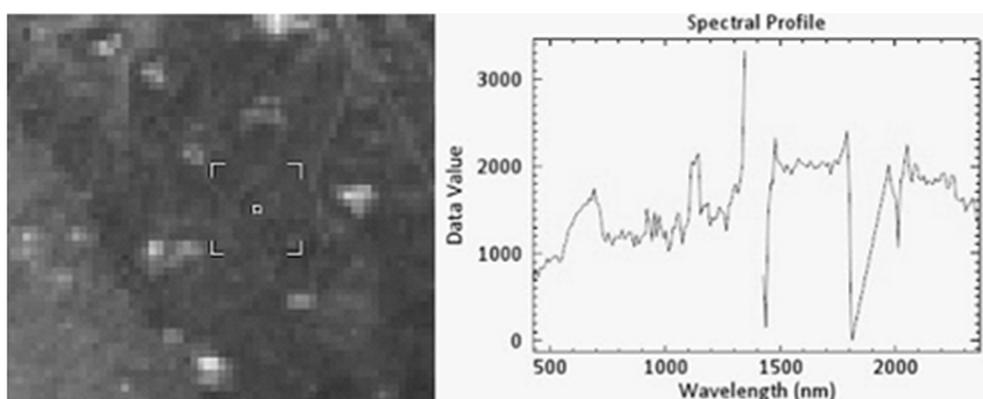


Рис. 3. Участок пустынного ландшафта с разреженным растительным покровом и его спектральный профиль

В целом можно выделить три большие группы индексов, которые позволяют оценивать:

- структуру растительности (наиболее важными параметрами здесь будут индекс площади листьев (LAI), зрелая биомасса и доля поглощенной фотосинтетически активной радиации (FPAR) [7, 10, 12]);
- биохимические параметры растительности (включают в себя воду, фотосинтетические и прочие пигменты (хлорофилл, антоцианы, каротиноиды), другие богатые азотом субстанции, например белки и структурные растительные компоненты, такие как лигнин и целлюлоза);
- степень стресса растительности и происходящие внутри растения физиологические процессы можно оценить по тонким изменениям в пигментном составе, влажности листьев [5, 11, 19, 24].

Наиболее важными фактами, используемыми при конструировании вегетационных индексов, являются следующие: поглощение растениями видимого спектра до красного (с локальным максимумом отражения в зеленой зоне) и скачковый рост отражения в ближнем инфракрасном диапазоне, что определяется спектром поглощения хлорофилла (максимумы в синей и красной зонах). Антоцианы поглощают весь видимый диапазон, кроме красного, а многие каротиноиды имеют пик поглощения в голубой зоне спектра. Жидкая вода имеет два пика поглощения на 970 и 1200 нм. Пики поглощения целлю-

лозы (2100 нм) и лигнина (1510 и 1754 нм) находятся в диапазоне 1500–2340 нм [4, 6, 9, 17, 20, 22, 23].

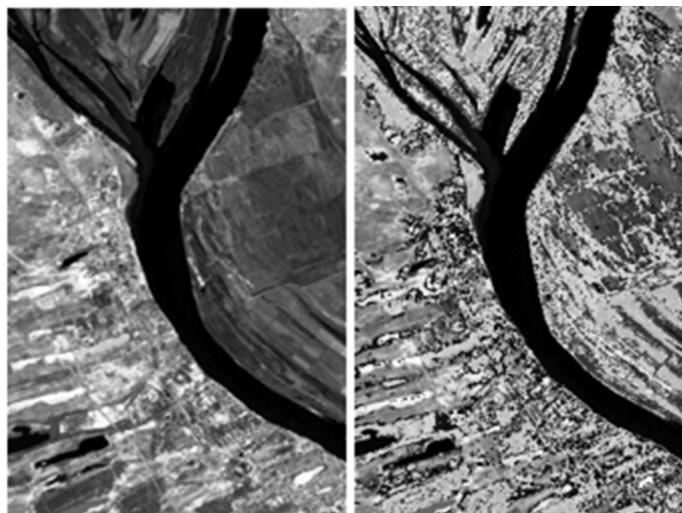


Рис. 4. Красные тона указывают на вегетирующую здоровую растительность (слева). Комбинация трех гиперспектральных индексов вегетации позволяет визуально проводить детальный анализ растительности (справа).  
Фрагмент сцены EO-1 Nuregion от 17 августа 2004 г.

При визуальном дешифрировании стоит задача выделить определяющие черты явления и проанализировать их распределение. Большое количество спектральных зон не позволяет охватить весь возможный спектр информации. При дешифрировании гиперспектральных данных возможен такой прием, как комбинация нескольких узкополосных вегетационных индексов в единое псевдоцветное изображение, комбинируя индексы, отражающие различные аспекты растительности, такие как хлорофилл, пигменты стресса и содержание влаги. Для мультиспектральных данных это также возможно, но набор возможных индексов гораздо уже, а сами они дают значительно более грубую информацию. Программный комплекс ENVI дает такую возможность. Нами использовались следующие узкополосные индексы: Water Band Index (WBI) отражающий содержание воды в растительном покрове и представляющий собой отношение зон 970 к 900 нм. При увеличении количества воды в растении поглощение на 970 нм возрастает относительно 900 нм [15, 16]; Carotenoid Reflectance Index 1, оценивающий содержание каротиноидов (пигментов, играющих важную роль в защите растений от избыточного света и, соответственно, указывающих на состояние стресса) по соотношению зон 510 и 550 нм [8] и Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) использующий высокое поглощение хлорофилла в красной и высокое отражение структурами растения в инфракрасной областях [18]. Результаты представлены на рисунке 4. В сравнении с традиционным цветосинтезом, где растительность отражена в красных тонах, комбинация узкополосных индексов дает более подробную картину внутренней структуры вегетационного покрова, а также позволяет выделить участки с отсутствием вегетации (в том числе деградированные и опустыненные). Подробная интерпретация этих данных требует наземных наблюдений.

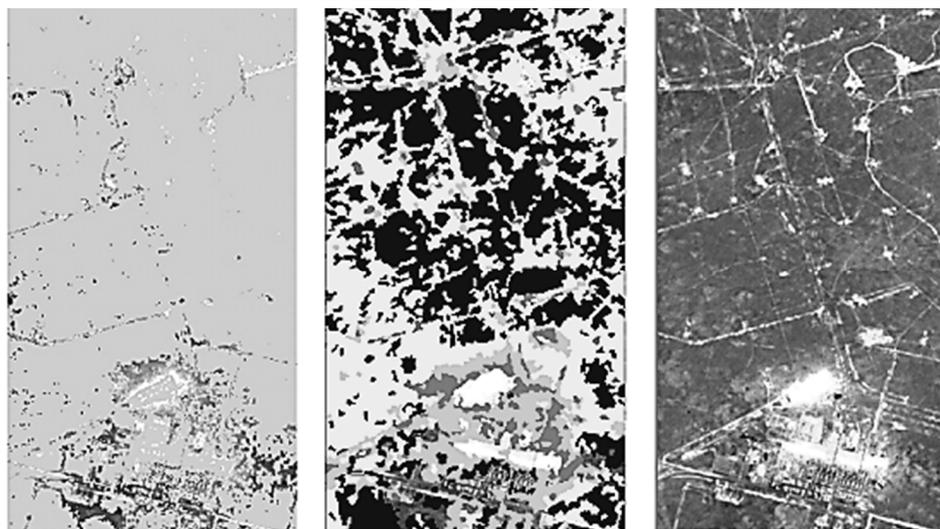


Рис. 5. Фрагмент участка эксплуатации Астраханского газового месторождения. Enhanced Vegetation Index показывает плохое состояние растительности желтым псевдоцветом (слева) и стандартное псевдоцветное изображение, где растительность отражена красным (справа). Классифицированное гиперспектральное изображение выделяет четыре класса деградации (в центре). Фрагмент сцены EO-1 Hyperion от 17 августа 2004 г.

Еще один пример обработки гиперспектральных данных приведен на рисунке 5, где изображен фрагмент участка эксплуатации Астраханского газового месторождения с промышленным зданием и скважинами. Значения Enhanced Vegetation Index (EVI), характерные для плохого состояния растительности (деградация, разреженный покров, мертвая биомасса) покрывают большую часть участка (желтый псевдоцвет), за исключением локаций повышенной влажности отмеченных красным тоном. Нами была выполнена классификация гиперспектрального снимка, без использования эталонных образцов (unsupervised), которая позволила выделить на этой территории 4 класса деградации. Таким образом, анализ гиперспектральных данных ДЗЗ позволяет получать более подробную информацию о процессах опустынивания и деградации земель на аридных территориях.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Германской службы академических обменов (DAAD) в рамках международного научно-образовательного сотрудничества по программе «Михаил Ломоносов» (проект 5.10011.2017/ДААД).*

#### Список литературы

1. Банкурова Р. У. Антропогенная деградация пустынь Северо-Западного Прикаспия / Р. У. Банкурова, Ф. Д. Алахвердиев, А. Ш. Ахахвердиев, Д. Ф. Алахвердиева // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. – 2008. – № 1. – С. 82–87.
2. Петров К. М. Региональные особенности глобального процесса опустынивания в Северо-Западном Прикаспии / К. М. Петров, В. А. Бананова, В. Г. Лазарева, А. С. Унагаев // Биосфера. – 2016. – № 1. – С. 49–62.
3. Шабанов Д. И. Использование ГИС-технологий и методов ДЗЗ при анализе пространственного распределения опустынивания на территории Северного Прикаспия / Д. И. Шабанов, М. М. Июлин, А. С. Борзова, Е. В. Агошкова // Вестник ВолГУ. Сер. 11. Естественные науки. – 2014. – № 4. – С. 48–56.

4. Bartholomeus H. M. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification / H. M. Bartholomeus, et al. // *Geoderma*. – 2008. – Vol. 145, № 1–2. — P. 28–36.
5. Barton C. V. M. Advances in remote sensing of plant stress / C. V. M. Barton // *Plant Soil*. – 2012. – Vol. 354, № 1–2. – P. 41–44.
6. Darvishzadeh R. Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index / R. Darvishzadeh. – ISPRS Comm. VII, 2006.
7. Delegido J., et al. Brown and green LAI mapping through spectral indices / J. Delegido, et al. // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2015. – Vol. 35, № PB. – P. 350–358.
8. Gitelson A. A. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy / A. A. Gitelson, et al. // *Photochem. Photobiol.* – 2002. – Vol. 75, № 3. – P. 272.
9. Haboudane D. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture / D. Haboudane, et al. // *Remote Sens. Environ.* – 2004. – Vol. 90, № 3. – P. 337–352.
10. Haboudane D. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture / D. Haboudane, et al. // *Remote Sens. Environ.* – 2004. – Vol. 90, № 3. – P. 337–352.
11. Knyazikhin Y. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content / Y. Knyazikhin, et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* – 2013. – Vol. 110, № 3. – P. E185–92.
12. Myneni R. B. MODIS Leaf Area Index (LAI) And Fraction Of Photosynthetically Active Radiation Absorbed By Vegetation (FPAR) Product / R.B. Myneni et al. // *Modis Atbd.* – 1999. – Ver. 4, № 4.0. – P. 130.
13. Pearlman J. Development and Operations of the EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer / J. Pearlman, et al. // *Int. Symp. Opt. Sci. Technol. Int. Soc. Opt. Photonics.* – 2000. – P. 243–253.
14. Pearlman J. The EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer / J. Pearlman, et al. // *IEEE Aerosp. Conf.* – 2016. – P. 1–47.
15. Penuelas J. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970) / J. Penuelas, et al. // *Int. J. Remote Sens.* – 1997. – Vol. 18, № 13. – P. 2869–2875.
16. Penuelas J. et al. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status // *Int. J. Remote Sens.* – 1993. – Vol. 14, № 10. – P. 1887–1905.
17. Roberts D. Hyperspectral Vegetation Indices / D. Roberts, K. Roth, R. Perroy // *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation.* – 2011. – P. 309–328.
18. Rouse J.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS / J. W. Rouse, et al. // *Third Earth Resour. Technol. Satell. Symp.* – 1973. – Vol. 1. – P. 325–333.
19. Schlemmera M. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels / M. Schlemmera, et al. // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2013. – Vol. 25, № 1. – P. 47–54.
20. Serrano L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals / L. Serrano, J. Peñuelas, S. L. Ustin // *Remote Sens. Environ.* – 2002. – Vol. 81, № 2–3. – P. 355–364.
21. USGS EO-1. – Режим доступа: <https://eo1.usgs.gov/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 25.01.2018).
22. Wu C. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation / C. Wu, et al. // *Agric. For. Meteorol.* – 2008. – Vol. 148, № 8–9. – P. 1230–1241.
23. Xu X. Assessing rice chlorophyll content with vegetation indices from hyperspectral data / X. Xu, et al. // *IFIP Advances in Information and Communication Technology.* – 2011. – Vol. 344 AICT, № PART 1. – P. 296–303.
24. Zarco-Tejada P. J. Remote Sensing of Vegetation Biophysical Parameters for Detecting Stress / P. J. Zarco-Tejada, G. Sepulcre-Cantó // *Estud. la Zo. no Saturada del Suelo vol. 8.* – 2007. – Vol. 8. – P. 37–44.

#### References

1. Bankurova R. U., Alakhverdiev F. D., Akhakhverdiev A. Sh., Alakhverdieva D. F. Antropogennaya degradatsiya pustyn Severo-Zapadnogo Prikaspiya [Anthropogenic degradation of the deserts of the North-Western Caspian]. *Izvestiya DGPU. Yestestvennye i tochnye nauki* [News of the State Pedagogical University. Natural and exact sciences], 2008, no. 1, pp. 82–87.
2. Petrov K. M., Bananova V. A., Lazareva V. G., Unagaev A. S. Regionalnye osobennosti globalnogo protsessa opustynivaniya v Severo-Zapadnom Prikaspii [Regional features of the global process of desertification in the North-Western Caspian Region]. *Biosfera* [Biosphere]. 2016, no. 1, pp. 49–62.
3. Shabanov D. I., Iolin M. M., Borzova A. S., Agoshkova Ye. V. Ispolzovanie GIS-tekhnologiy i metodov DZZ pri analize prostranstvennogo raspredeleniya opustynivaniya na territorii

Severnogo Prikaspiya [The use of GIS technologies and remote sensing methods in the analysis of the spatial distribution of desertification in the Northern Caspian region]. *Vestnik VolGU. Seriya 11. Yestestvennye nauki* [Bulletin of the VolSU. Series 11. Natural Sciences], 2014, no. 4, pp. 48–56.

4. Bartholomeus H. M., et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification. *Geoderma*, 2008, vol. 145, no. 1–2, pp. 28–36.

5. Barton C. V. M. Advances in remote sensing of plant stress. *Plant Soil*, 2012, vol. 354, no. 1–2, pp. 41–44.

6. Darvishzadeh R. *Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index*, ISPRS Comm. VII, 2006.

7. Delegido J., et al. Brown and green LAI mapping through spectral indices. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2015, vol. 35, no. PB, pp. 350–358.

8. Gitelson A. A., et al. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochem. Photobiol.*, 2002, vol. 75, no. 3, pp. 272.

9. Haboudane D., et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 2004, vol. 90, no. 3, pp. 337–352.

10. Haboudane D., et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predict-ing green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 2004, vol. 90, no. 3, pp. 337–352.

11. Knyazikhin Y., et al. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2013, vol. 110, no. 3, pp. E185–92.

12. Myneni R. B., et al. MODIS Leaf Area Index (LAI) And Fraction Of Photosynthetically Active Radiation Absorbed By Vegetation (FPAR) Product. *Modis Atbd.*, 1999, version 4, no. 4.0, pp. 130.

13. Pearlman J., et al. Development and Operations. pp. 243–253.

14. Pearlman J., et al. The EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer. *IEEE Aerosp. Conf.*, 2016. pp. 1–47.

15. Penuelas J., et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *Int. J. Remote Sens.*, 1997, vol. 18, no. 13, pp. 2869–2875.

16. Penuelas J., et al. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. Remote Sens.*, 1993, vol. 14, no. 10, pp. 1887–1905.

17. Roberts D., Roth K., Perroy R. Hyperspectral Vegetation Indices. *Hyperspectral Re-mote Sensing of Vegetation*, 2011. — P. 309–328.

18. Rouse J.W. et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Third Earth Resour. Technol. Satell. Symp. 1973, vol. 1, pp. 325–333.

19. Schlemmer M., et al. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2013, vol. 25, no. 1, pp. 47–54.

20. Serrano L., Peñuelas J., Ustin S. L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 81, no. 2–3, pp. 355–364.

21. *USGS EO-1*. Available at: <https://eo1.usgs.gov/> (accessed 25.01.2018).

22. Wu C., et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agric. For. Meteorol.*, 2008, vol. 148, no. 8–9, pp. 1230–1241.

23. Xu X., et al. Assessing rice chlorophyll content with vegetation indices from hyperspec-tral data. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2011, vol. 344 AICT, no. PART 1, pp. 296–303.

24. Zarco-Tejada P. J., Sepulcre-Cantó G. Remote Sensing of Vegetation Biophysical Parameters for Detecting Stress. *Estud. la Zo. no Saturada del Suelo vol. 8*, 2007, vol. 8, pp. 37–44.