

Оценка засорённости посевов пшеницы по геоботаническим, наземным спектрометрическим и спутниковым данным

© 2023. Т. И. Письман¹, к. б. н., с. н. с., И. Ю. Ботвич¹, м. н. с., М. Г. Ерунова², к. т. н., с. н. с., Д. В. Емельянов¹, аспирант, Н. А. Огородов², м. н. с., А. А. Шпедт³, д. с.-х. н., г. н. с., А. П. Шевырнов¹, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
¹Институт биофизики СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50–50,
²ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», 660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50,
³Красноярский НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 66,
 e-mail: irina.pugacheva@mail.ru, tpisman@mail.ru

В работе описана возможность использования данных наземного спектрометрирования и спутниковых снимков группировки PlanetScore высокого пространственного разрешения для оценки засорённости посевов зерновых культур. Для дешифрирования космических снимков использовали вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Биологическая оценка степени засорённости посевов определялась по четырехбалльной шкале. В результате мониторинга посевов пшеницы на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край) выявлено влияние сорной растительности на величину NDVI сельскохозяйственных посевов. Усреднённый NDVI для посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов пшеницы с высокой степенью засорённости. На основании спутниковых данных построены карты пространственного распределения индекса NDVI в разное время периода вегетации (09.07.2019 и 02.08.2019). На них достоверно выявлены участки посевов пшеницы с разным количеством сорняков. Показана возможность дешифрирования посевов пшеницы с разной степенью засорённости по наземным спектрометрическим и спутниковым данным.

Ключевые слова: пшеница, засорённость, PlanetScore, NDVI, наземное спектрометрирование, коэффициент спектральной яркости.

Wheat crops weediness assessment based on geobotanical, ground and satellite spectral data

© 2023. T. I. Pisman¹ ORCID: 0000-0001-8951-4662, I. Y. Botvich¹ ORCID: 0000-0001-7359-4514, M. G. Erunova² ORCID: 0000-0002-1922-1036, D. V. Emelyanov¹ ORCID: 0000-0002-0752-3512, N. A. Ogorodov² ORCID: 0000-0001-7077-8529, A. A. Shpedt³ ORCID: 0000-0001-7143-1252, A. P. Shevyrnogov¹ ORCID: 0000-0001-8019-704X,
¹Institute of Biophysics SB RAS, 50–50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
²Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
³Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS”, 66, Svobodnyi Prospekt, Krasnoyarsk, Russia, 660041,
 e-mail: irina.pugacheva@mail.ru, tpisman@mail.ru

The paper describes the possibility of using land spectrometry data and high-resolution satellite images of the PlanetScope grouping to assess weediness of cereal crops. The objects of monitoring were on the territory of the Krasnoyarsk Agricultural Research Institute of Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of SB RAS” (Middle Siberia, Krasnoyarsk region). For interpretation satellite images, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

vegetation index was used. Biological assessment of the degree of crops weediness was determined on a four-level scale. As the result of monitoring wheat crops the influence of weed vegetation on the value of NDVI of agricultural crops was revealed. The average NDVI for wheat planting with a low degree of weediness is higher than the NDVI of wheat plantings with a high degree of weediness. As the result of the analysis of the spectra of cultural and weed vegetation on July 09, 2019, a difference in the value of the spectral brightness coefficient in the near-infrared region was noted, which is mainly connected with different structure of plants. For wheat planting with a strong degree of weediness (3 level) in the near-infrared region, the spectral brightness coefficient reaches 50%, while with a weak degree of weediness (1 level) below 40%. The NDVI analysis of wheat plantings with different levels of weediness during the whole vegetation period showed the same dynamics. However, for fields with a low degree of weediness, the NDVI value reaches 0.5 in the middle of the growing season, while for fields with a high degree of weediness, the NDVI value reaches only 0.35. According to the satellite data, spatial distribution maps of NDVI were constructed in different time of growing season (July 09, 2019 and August 02, 2019). The areas of wheat plantings with different degrees of weediness are reliably revealed on them.

Keywords: wheat, weediness, PlanetScope, NDVI, land spectral measurement, spectral brightness coefficient.

Высокая культура земледелия – необходимое условие повышения урожайности любых сельскохозяйственных культур. Одним из важнейших резервов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур является оценка санитарного состояния полей и очищение их от сорных растений [1].

Засорённость посевов – большая проблема, особенно при низком уровне агротехники и недостатке средств у фермеров на приобретение гербицидов. Тип засорённости, распространённость сорняков в посевах, их фенология имеют значительную сезонную изменчивость из-за особенностей годовых метеорологических условий, севооборотов возделываемых культур, почвенных условий, особенности агротехники [2].

При решении подобных вопросов наиболее эффективным средством (особенно на уровне отдельных регионов и стран) служит использование технологий спутникового мониторинга [3, 4]. В большинстве случаев спутниковые данные используются для мониторинга сельскохозяйственных угодий, для оценки площадей посевов сельскохозяйственных культур и их состояния, а также для прогнозирования их урожайности [5].

Среди задач текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особое место занимает оценка санитарного состояния посевов, т. е. выявление факта засорённости культуры сорняками.

Как правило, для этих задач применяется методика определения различий в спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) растительности в течение вегетационного периода и изображений индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) полей, по которым можно судить об их состоянии [6, 7]. Индекс NDVI широко используется для анализа состояния растительности [8, 9], включая посевы сельскохозяйственных культур [10].

Целью работы является оценка засорённости посевов пшеницы по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScope в течение вегетационного сезона.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются посевы сельскохозяйственных культур на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). Исследованы посевы яровой пшеницы Свирель (*Triticum vulgare*) с разной степенью засорённости на участках № 22 и № 23 (рис. 1) за вегетационный период 2019 г. Для оценки степени засорённости использованы геоботанические, наземные спектрометрические и спутниковые данные PlanetScope.

Для биологической оценки степени засорения посевов зерновых культур используется визуальный метод учёта сорняков. Он заключается в том, что исследуемое поле проходят по диагонали и через равные промежутки регистрируют сорняки всех видов. Данные наблюдений оценивают по четырехбалльной шкале: 1 балл – слабая степень засорения, сорняки встречаются единично (до 5% от числа культурных растений); 2 балла – средняя степень засорения, сорняки заметны среди культурных растений (до 25%); 3 балла – сильная степень засорения, количество сорняков близко к числу культурных растений (до 50%); 4 балла – очень сильная степень засорения, количество сорняков такое же или больше, чем культурных растений, и рост последних сильно подавлен.

Отражательные спектральные свойства природных объектов принято выражать коэффициентом спектральной яркости (КСЯ). Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости проводили одновременно с геоботаническими исследованиями 09.07.2019. Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический

комплекс, состоящий из полевого портативного спектрорадиометра Spectral Evolution PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения [11, 12]. С помощью данного комплекса проводили измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъёмкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ посевов пшеницы выполняли с 11 до 15 часов местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов.

Для дешифрирования сельскохозяйственных посевов с различной степенью засорённости использовали спутниковые данные PlanetScore. Крупнейшая группировка спутников компании PlanetScore предоставляет данные высокого пространственного разрешения (3 м) на ежедневной основе со спутников Dove [13]. Спектральные каналы представлены четырьмя диапазонами: 455–515, 500–590, 590–670, 780–860 нм.

Для расчёта NDVI по спутниковым данным PlanetScore проведено формирование набора ортотрансформированных снимков в Онлайн-сервисе Planet Explorer за вегетационный период 2019 г., выбирали «безоблачные данные». В каждом полученном снимке все спектральные каналы имеют свои (индивидуальные) калибровочные коэффициенты. В программе ГИС QGIS через модуль «Калькулятор растров» для каждого снимка рассчитывали спектральный индекс NDVI с учётом

индивидуальных коэффициентов. Если территория состоит из нескольких снимков, то снимки сшивали в «единый» растр.

Цифровая карта сельскохозяйственных полей и набор NDVI-снимков за 2019 г. позволили получить статистические значения NDVI для каждого поля в течение всего вегетационного периода [14].

По наземным спектрометрическим и спутниковым данным рассчитан нормализованный разностный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI). Значения NDVI рассчитывали по формуле (1):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где RED – КСЯ в красной части видимого диапазона, NIR – КСЯ ближнего ИК-излучения. Для зелёной растительности индекс NDVI обычно принимает значения от 0,2 до 0,8.

Результаты и обсуждение

Сорные растения или сорняки – дикорастущие растения, обитающие на землях, используемых в качестве сельскохозяйственных угодий. Вред, который наносят сорняки, связан как со снижением урожайности, так и с ухудшением качества сельскохозяйственной продукции. Культурные и сорные растения конкурируют друг с другом за воду, свет, питательные вещества и т. д.

На рисунке 1 (см. цв. вкладку III) представлена карта расположения участков посевов яровой пшеницы и участков без посева с различной степенью засорённости на участках 22 и 23,

Виды сорняков, встречающиеся на полях с разной степенью засорённости
Weed species found in fields with different degrees of weediness

Виды сорняков Weed species	Число участков, в которых встречается сорняк The number of points at which weed occurs
Просо сорнополевое / Millet weed (<i>Panicum capillare</i> L.)	15
Осот розовый / Canada Thistle (<i>Cirsium arvense</i> L.)	16
Марь белая / White goosefoot (<i>Chenopodium album</i> L.)	5
Осот жёлтый / Thistle common sow (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	9
Липучка оттопыренная / Two-row Stickseed (<i>Lappula myosotis</i> Moench.)	4
Конопля сорная / Hemp ruderal (<i>Cannabis ruderalis</i> Janisch.)	7
Ширица запрокинутая / Red-root amaranth (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.)	4
Овсяг обыкновенный / Wild oat (<i>Avena fatua</i> L.)	4
Одуванчик обыкновенный / Dandelion (<i>Taraxacum vulgare</i> (L.) Webb ex F.Y. Wigg.)	1

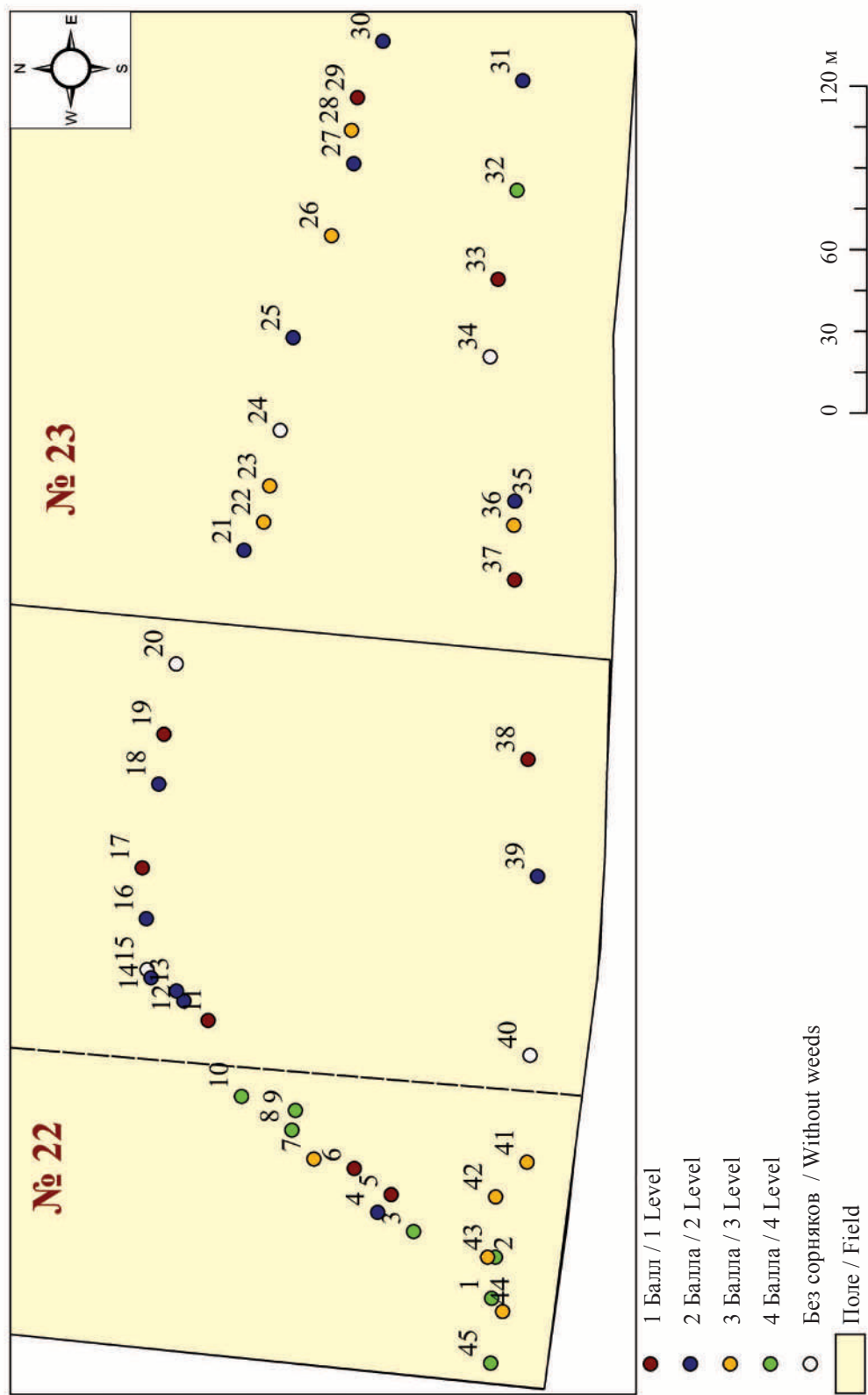


Рис. 1. Карта расположения участков с разной степенью засорённости полей, засеянных пшеницей (№ 11–40), и не засеянных (№ 1–10 и № 41–45)
Fig. 1. Map of the points location with varying degrees of weediness in fields sown with wheat (No. 11–40) and non-sown (No. 1–10 and No. 41–45)

Т. И. Письман, И. Ю. Ботвич, М. Г. Ерунова, Д. В. Емельянов,
Н. А. Огородов, А. А. Шпедт, А. П. Шевырногов
«Оценка засорённости посевов пшеницы по геоботаническим,
наземным спектрометрическим и спутниковым данным». С. 110.

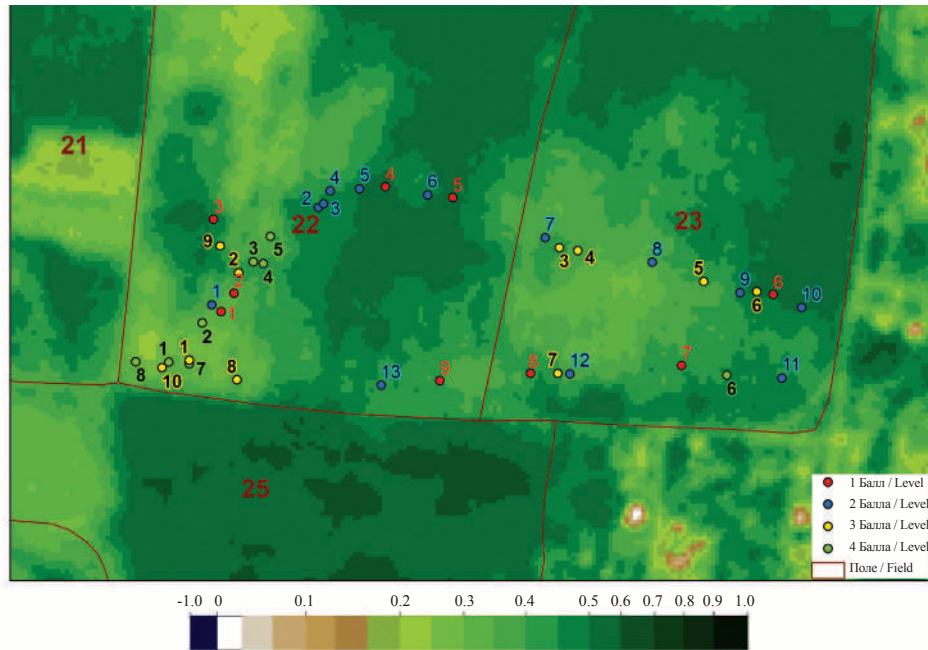


Рис. 4. Карта пространственного распределения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 09.07.2019 по спутниковым данным PlanetScore
Fig. 4. Map of the spatial distribution of NDVI wheat crops with different degrees of weediness for 07.09.2019 according to satellite data from PlanetScore

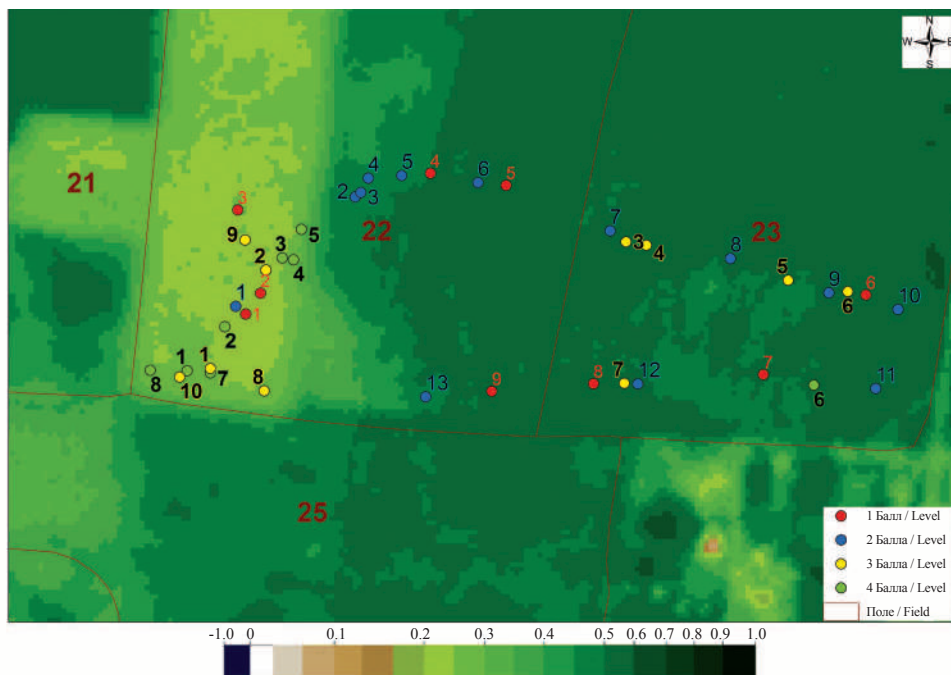


Рис. 5. Карта пространственного распределения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 02.08.2019 по спутниковым данным PlanetScore
Fig. 5. Map of the spatial distribution of NDVI wheat crops with varying degrees of weediness for 08.02.2019 according to satellite data from PlanetScore

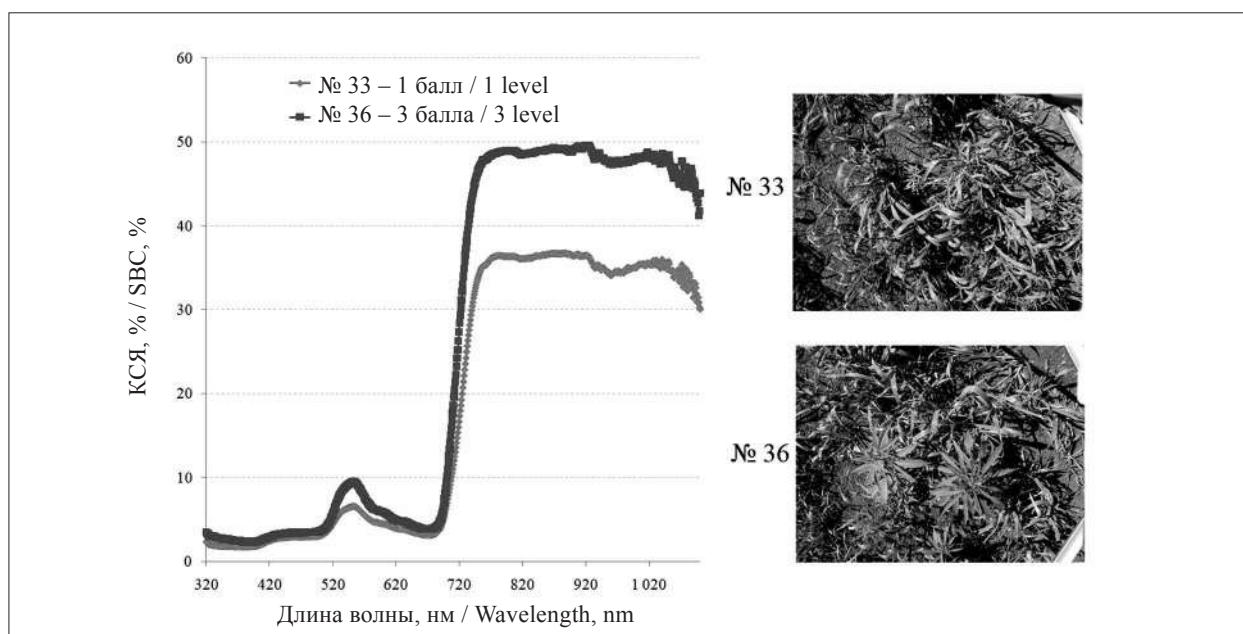


Рис. 2. Спектры отражения посевов пшеницы в зависимости от степени засорённости: № 33 – слабая степень (1 балл), № 36 – сильная степень (3 балла)

Fig. 2. The reflection spectra of wheat crops depending on the degree of weediness: No. 33 – a weak degree of weediness (1 level), No. 36 – a strong degree of weediness (3 level)

в которых одновременно (09.07.2019) проводили геоботанические и наземные спектрометрические исследования. Точки 1–10 и 41–45 расположены на незасеянных участках, точки 11–40 расположены на участках с посевами яровой пшеницы. Участки посевов пшеницы с разным количеством сорняков обозначены следующим образом: красными и синими кружками – с низкой степенью засорённости (1 и 2 балла), жёлтыми и зелёными кружками – с высокой степенью засорённости (3 и 4 балла). В результате исследованы участки с засорённостью 1 балл – в 9 точках, 2 балла – в 13 точках, 3 балла – в 10 точках и 4 балла – в 8 точках.

С помощью геоботанических исследований определены основные виды сорняков (табл.).

Применение результатов наземных подспутниковых исследований необходимо для повышения точности дешифрирования космических снимков [15, 16]. Один из результатов наземных спектрометрических исследований посевов пшеницы со слабой (1 балл) и сильной (3 балла) степенью засорённости коноплей сорной (*Cannabis ruderalis* Janisch.) представлен на рисунке 2. Измерения проведены 09.07.2019 в фазу бутонизации – цветения. Характерным признаком растительности и её состояния является спектральная отражательная способность, выражающаяся через коэффициент яркости. Отмечено различие в величине коэффициента спектральной яр-

кости культурной и сорной растительности в ближней инфракрасной области, которое, в основном, связано с различной структурой растений. Для посевов пшеницы с сильной степенью засорённости (3 балла) в ближней инфракрасной области КСЯ достигает 50%, тогда как со слабой степенью засорённости (1 балл) ниже 40%. Известно, что на значения индекса влияет видовой состав растительности, её сомкнутость, состояние и тип почвы под разреженной растительностью [17].

На рисунке 3 представлены усреднённые значения NDVI посевов пшеницы с различной степенью засорённости, рассчитанные по данным наземного спектрометрирования. Так как наземные спектры сделаны в нескольких повторностях (на посевах с засорённостью 1 балл – в 9 точках, 2 балла – в 13 точках, 3 балла – в 10 точках и 4 балла – в 8 точках) (рис. 1), то усреднение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости позволило повысить точность дешифрирования. В результате выявлено, что усреднённый NDVI посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов пшеницы с высокой степенью засорённости. Величина NDVI посевов пшеницы без сорняков и с сорняками в 1 и 2 балла достигает значений (0,75–0,79), тогда как с засорённостью в 3 и 4 балла приближается к значениям (0,68–0,69).

На рисунках 4 и 5 (см. цв. вкладку IV) представлены карты пространственного рас-

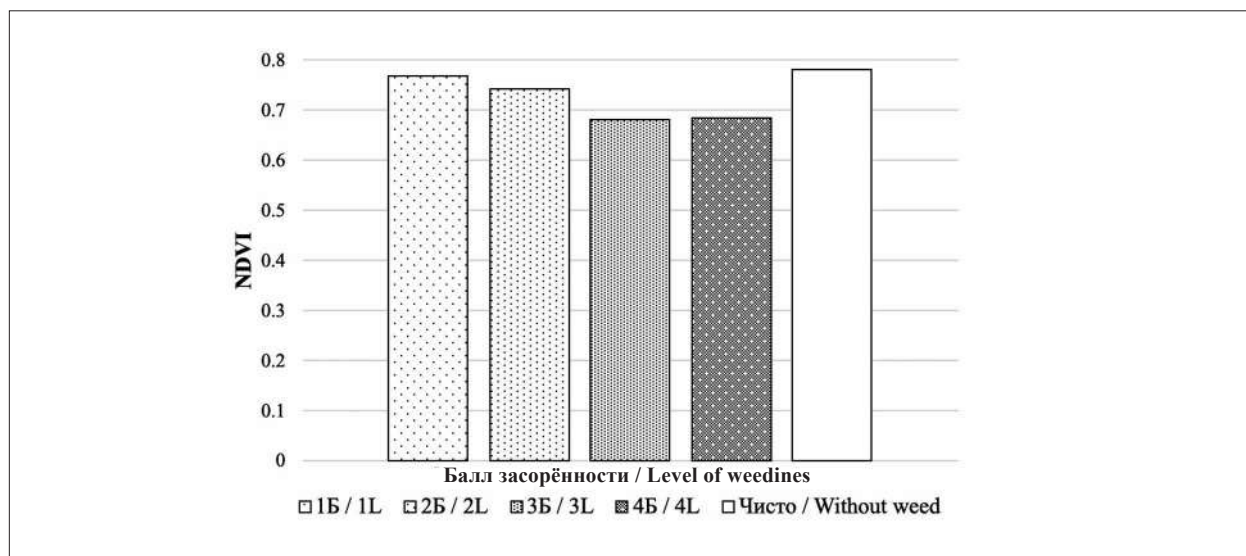


Рис. 3. Среднее значение NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости по данным наземного спектрометрирования
Fig. 3. The average NDVI value of wheat crops with different degrees of weediness according to ground-based spectrometry

предела NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости за 09.07.2019 г. и 02.08.2019 г. В течение вегетационного периода растения проходят определённые фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов [18]. Величина NDVI является показателем фотосинтетически активной биомассы: чем темнее цвет, тем выше величина NDVI и тем больше количество сырой надземной фитомассы культурной и сорной растительности. Жёлтым и зелёным цветом помечены точки с сильной и очень сильной степенью засорённости, синим и красным – точки со слабой и средней степенью засорённости (рис. 4, см. вкладку IV). Высокая величина NDVI соответствует большому количеству сырой надземной биомассы культурных растений (пшеницы) при низкой степени засорённости. Низкая величина NDVI соответствует небольшому количеству сырой надземной биомассы культурных растений при высокой степени засорённости.

В августе начинается обильное цветение сорных растений. Соответственно уменьшается количество хлорофилла, в связи с этим уменьшается значение NDVI сорной растительности. Особенно это хорошо видно на карте распределения NDVI растительности засеянных и не засеянных полей за 02.08.2019 (рис. 5, см. цв. вкладку IV).

Жёлтый прямоугольник обозначает незасеянное поле с сорными растениями. На этом

участке преобладают точки с сильной и очень сильной степенью засорённости, которые обозначены кружками жёлтого и зелёного цвета. С другой стороны, на засеянных полях 02.08.2019 пшеница находится в стадии конца цветения. На данный момент в ней содержится большое количество хлорофилла и, в связи с этим выявлено высокое значение NDVI посевов. Отсюда видна возможность дешифрирования полей с сорными растениями по спутниковым данным PlanetScope в течение периода вегетации.

Заключение

Для оценки засорённости сельскохозяйственных посевов проведено геоботаническое исследование, наземное спектрометрирование и дешифрирование серии космических снимков PlanetScope в течение 2019 года на территории Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край). По результатам рассчитаны значения NDVI посевов пшеницы с разной степенью засорённости.

В результате мониторинга посевов зерновых культур по наземным спектрометрическим и спутниковым данным PlanetScope выявлено влияние сорной растительности на величину NDVI сельскохозяйственных посевов.

Усреднённый NDVI, рассчитанный по наземным спектрам, посевов пшеницы с низкой степенью засорённости выше NDVI посевов

пшеницы с высокой степенью засорённости. Величина NDVI посевов пшеницы без сорняков и с засорённостью в 1 и 2 балла достигает значений (0,75–0,79), тогда как с засорённостью в 3 и 4 балла приближается к значениям (0,68–0,69).

На основании спутниковых данных построены карты пространственного распределения индекса NDVI в разное время периода вегетации (09.07.2019 и 02.08.2019). На них достоверно выявлены участки посевов пшеницы с разной степенью засорённости.

Показана возможность дешифрирования посевов зерновых культур с разным количеством сорняков по наземным спектрметрическим и спутниковым данным.

Литература

1. Баранов А.И., Гринько А.В. Влияние гербицидов на засорённость и урожайность ярового ячменя // Зерновое хозяйство России. 2014. № 6. С. 39–44.

2. Савин И.Ю., Докукин П.А., Вернук Ю.И., Жоголев А.В. О влиянии засорённости на NDVI посевов ярового ячменя, определяемый по спутниковым данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 185–195.

3. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the global agriculture monitoring (GLAM) project // Remote Sens. 2010. V. 2. No. 6. P. 1589–1609.

4. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // International Journal of Digital Earth. 2014. V. 7. No. 2. P. 113–137.

5. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection // Remote Sens. 2013. V. 5. No. 4. P. 1704–1733.

6. Архипова О.Е., Качалина Н.А., Тютюнов Ю.В., Ковалев О.В. Оценка засорённости антропогенных фитоценозов на основе дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полынолистной) // Исследования Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26.

7. Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 72–83.

8. Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий // Исследования Земли из космоса. 2014. № 3. С. 65–77.

9. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне

России с использованием спутниковых наблюдений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70.

10. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследования Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31.

11. Шевырнов А.П., Письман Т.И., Кононова Н.А., Ботвич И.Ю., Ларько А.А., Высоцкая Г.С. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.

12. Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // Biophysics. 2019. V. 64. No. 4. P. 588–592.

13. Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018 [Электронный ресурс] <https://api.planet.com> (Дата обращения: 10.01.2019).

14. Erunova M.G., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Yakubailik O.E. Geospatial database for digitalization of agriculture of the Krasnoyarsk territory // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. V. 315. No. 3. Article No. 32022.

15. Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., SullaMenashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // Rem. Sens. Env. 2011. V. 115. P. 3539–3553.

16. Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf. 2009. V. 11. No. 2. P. 130–141.

17. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sens. Environ. 2002. V. 81. No. 2–3. P. 337–354.

18. Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.

References

1. Baranov A.I., Grinko A.V. The effect of herbicides on weediness and yield of spring barley // Zernovoye khozyaystvo Rossii. 2014. No. 6. P. 39–44 (in Russian).

2. Savin I.Yu., Dokukin P.A., Vernyuk Yu.I., Zhogolev A.V. On the effect of weediness on NDVI of spring barley crops, determined by MODIS satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya

- Zemli iz kosmosa. 2017. V. 14. No. 3. P. 185–195 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-185-195
3. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J. Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the global agriculture monitoring (GLAM) project // *Remote Sens.* 2010. V. 2. No. 6. P. 1589–1609. doi: 10.3390/rs2061589
4. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // *International Journal of Digital Earth.* 2014. V. 7. No. 2. P. 113–137. doi: 10.1080/17538947.2013.821185
5. Rembold F., Atzberger C., Savin I., Rojas O. Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection // *Remote Sens.* 2013. V. 5. No. 4. P. 1704–1733. doi: 10.3390/rs5115572
6. Arkhipova O.E., Kachalina N.A., Tyutyunov Yu.V., Kovalev O.V. Estimation of contamination of anthropogenic phytocenoses based on remote sensing of the earth (on the example of ragweed) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 6. P. 15–26 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961414050017
7. Mikhailenko I.M., Voronkov I.V. Methods for the detection of weeds, diseases and plant pests according to remote sensing // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. V. 13. No. 3. P. 72–83 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-72-83
8. Elsakov V.V., Kulugina E.E. Vegetation cover of the Ugra Peninsula under the conditions of climatic changes of recent decades // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 3. P. 65–77 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961414030038
9. Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Razzhivin V.Yu. Modeling bio-productivity in the Arctic zone of Russia using satellite observations // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2015. No. 3. P. 60–70 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961415030021
10. Terekhin E.A. Assessment of seasonal values of the vegetation index (NDVI) for the detection and analysis of the state of crops of crops // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2015. No. 1. P. 23–31 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961415010108
11. Shevyrnogov A.P., Pisman T.I., Kononova N.A., Botvich I.Yu., Larko A.A., Vysotskaya G.S. Seasonal dynamics of vegetation of fallow lands of the Krasnoyarsk forest-steppe according to ground and satellite data // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa.* 2018. No. 6. P. 39–51 (in Russian). doi: 10.31857/S020596140003367-4
12. Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The information content of spectral vegetation indices in the interpretation of satellite images of cultivated fields // *Biophysics.* 2019. V. 64. No. 4. P. 588–592. doi: 10.1134/S0006350919040158
13. Planet Team. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth; Planet Company: San Francisco, CA, USA, 2018 [Internet resource] <https://api.planet.com> (Accessed: 10.01.2019).
14. Erunova M.G., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N., Yakubailik O.E. Geospatial database for digitalization of agriculture of the Krasnoyarsk territory // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations.* 2019. V. 315. No. 3. Article No. 32022. doi: 10.1088/1755-1315/315/3/032022
15. Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., SullaMenashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia // *Rem. Sens. Env.* 2011. V. 115. P. 3539–3553. doi: 10.1016/j.rse.2011.08.016
16. Hese S., Schmullius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.* 2009. V. 11. No. 2. P. 130–141. doi: 10.1016/j.jag.2008.12.002
17. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment.* 2002. V. 81. No. 2–3. P. 337–354. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X
18. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Identification of areas of mass growth of the hogweed *Sonchus oleraceus* using spectral indices according to Sentinel-2 // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-034-040