

УДК: 10.18522/2308-9709-2022-39-5  
<https://new.jbks.ru/archive/issue-39/article-5>

# Идентификация сорных видов растений в агроценозах озимой пшеницы по данным гиперспектральной съемки

[Дмитриев П. А.<sup>1</sup>](#), [Вардуни Т. В.<sup>2</sup>](#), [Купрюшкин Д. П.<sup>3</sup>](#), [Дмитриева А. А.<sup>4</sup>](#), [Тарик Е. П.<sup>5</sup>](#)

1. Старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия НИИ Биологии ЮФУ.
2. Директор ботанического сада ЮФУ
3. Ботанический сад Южного федерального университета
4. Ботанический сад Южного федерального университета
5. Ботанический сад Южного федерального университета

В работе предпринята попытка оценить возможность использования вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки, для идентификации сорных видов растений в агроценозах озимой пшеницы. Объектами исследования послужили образцы *Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst., *Galium humifusum* M. Bieb., *Lamium amplexicaule* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult. и *Sinapis arvensis* L. Изучение спектральных характеристик выбранных объектов проводилось с использованием кадровой гиперспектральной камеры Cubert UHD185. Фиксировалось отраженное электромагнитное излучение от образцов в диапазоне 450–950 нм. По данным спектральной съемки было рассчитано по 80 вегетационных индексов для каждого образца. Для сравнения средних значений вегетационных индексов был применен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), метод Random forest (RF) и Principal component analysis (PCA). Полученные результаты подтверждают возможность использования гиперспектральных сенсоров для идентификации сорных видов растений в агроценозах озимой пшеницы по данным гиперспектральной съемки с помощью вегетационных индексов.

## Введение

Производство зерна выступает в качестве главного фактора обеспечения национальной и продовольственной безопасности государства, а также является основным условием устойчивого развития сельского хозяйства и АПК в целом. Снижение урожайности озимой пшеницы происходит в результате конкуренции сельскохозяйственных культур и сорных растений за элементы питания, воду, свет. Между количеством сорных растений и урожаем зерна озимой пшеницы установлена сильная прямая коррелятивная зависимость (Лаптиев и др., 2011; Токарев, 2015; Павлюшин и др., 2015; Оказова, 2015). Поэтому борьба с сорными растениями в посевах сельскохозяйственных культур является важным условием получения высоких и устойчивых урожаев.

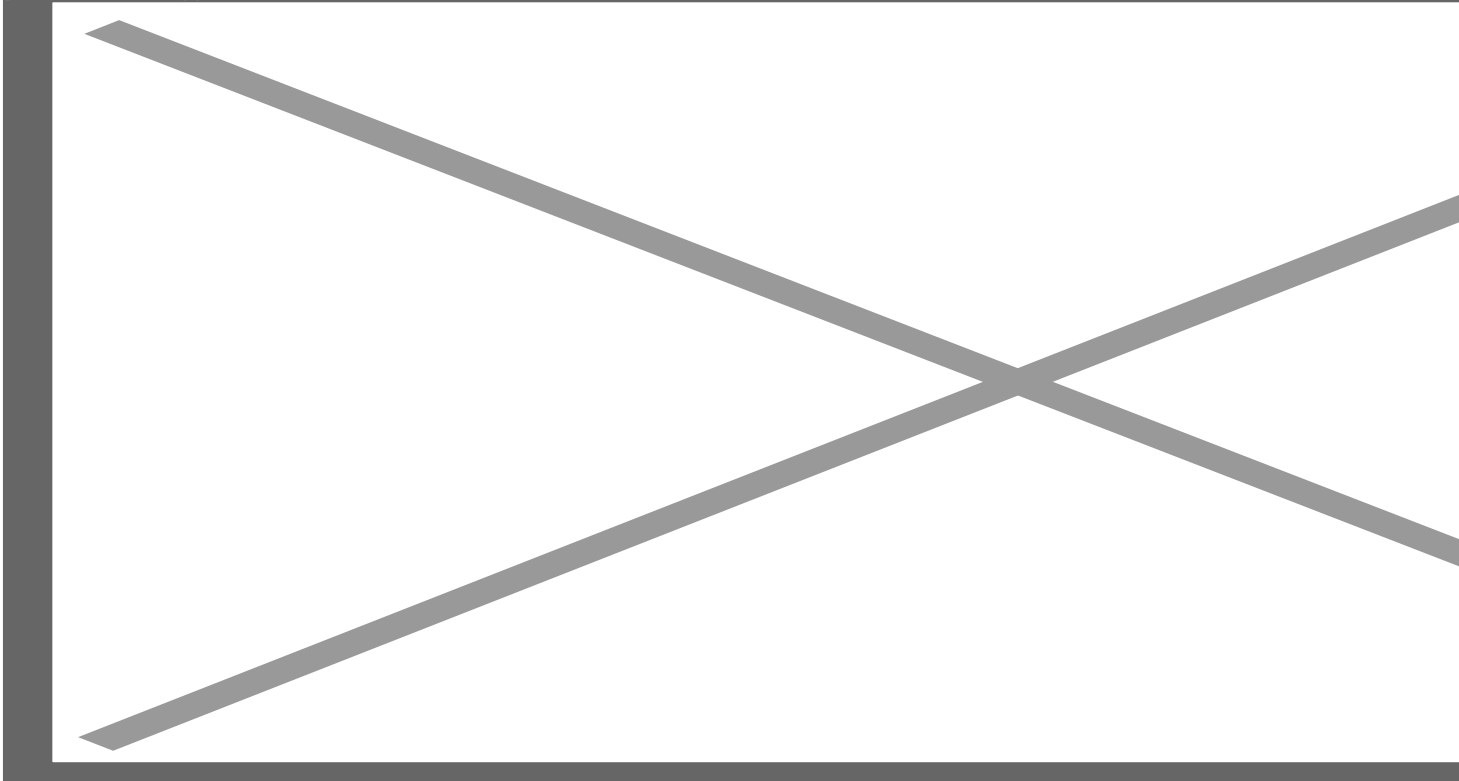
В связи с этим, весьма актуальной является разработка принципиально новых средств мониторинга и оперативного контроля состояния агроценозов озимой пшеницы. Большие перспективы в этой области предоставляют методы дистанционного зондирования Земли.

Целью данной работы была оценка возможностей использования вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки, для идентификации сорных видов растений в агроценозах озимой пшеницы.

## Материалы и методы

Исследование проводилось на северо-восточной окраине х. Веселый Мясниковского р-на Ростовской области в мае 2021 года на посевах озимой пшеницы (рис. 1). Площадь исследуемой территории 46 гектар, периметр 2,8 км<sup>2</sup>. Объектами исследования послужили образцы *Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst., *Galium humifusum* M. Bieb., *Lamium amplexicaule* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult. и *Sinapis arvensis* L.

Image not found or type unknown



*Рис. 1 – Регион исследования*

Климат данного региона умеренно континентальный, засушливый. Среднегодовое количество осадков составляет 548 мм, большая их часть выпадает в безморозный период. Лето жаркое, средняя температура июля +22...+23 °С., максимальная +40 °С. Зима умеренно мягкая, средняя температура января -5 °С, средний абсолютный минимум температуры воздуха -20..-25 °С, абсолютный минимум -32 °С. Вегетационный период длится 216 дней (с 1 апреля по 4 ноября), безморозный период – 258 дней.

Изучение спектральных характеристик выбранных объектов проводилось с использованием кадровой гиперспектральной камеры Cubert UHD185 (Bareth et al., 2015.; Aasen et al., 2015) (рис. 2, табл. 1).

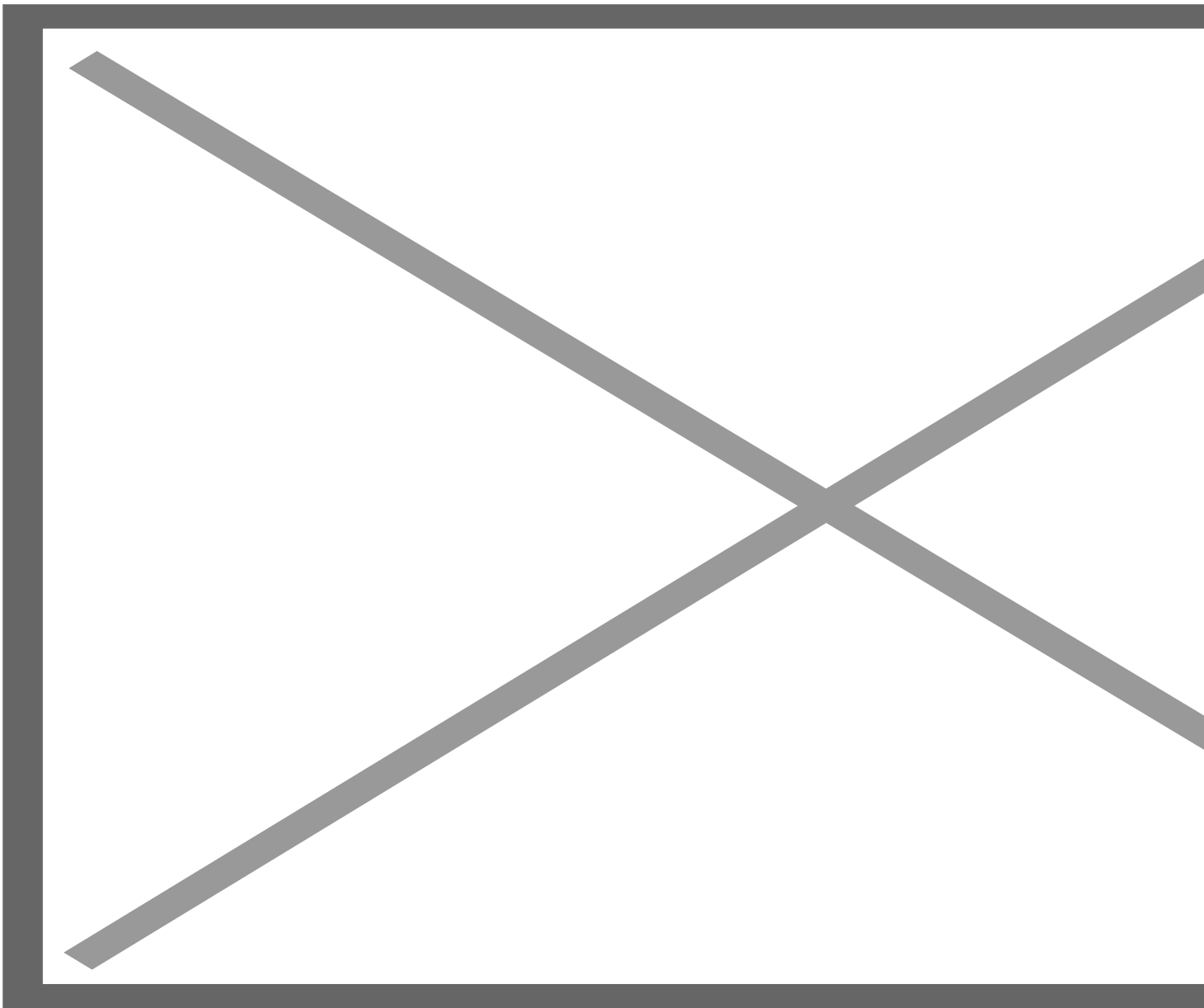


Рис. 2 – Сбор спектральных характеристик сорных видов растений с помощью гиперспектральной камеры Cubert UHD 185

Таблица 1 – Характеристики гиперспектральной камеры Cubert UHD 185

Модель	Cubert UHD 185
Технология	MPS
Количество спектральных каналов	125

Спектральная производительность	2500 спектра
Спектральный диапазон	450–950 нм
Спектральное разрешение	4 нм
Тип камеры	Кадровая
Тип сенсора	Si CCD
Разрядность сигнала	12 бит
Отношение сигнал/шум	58 дБ
Динамический диапазон	68 дБ

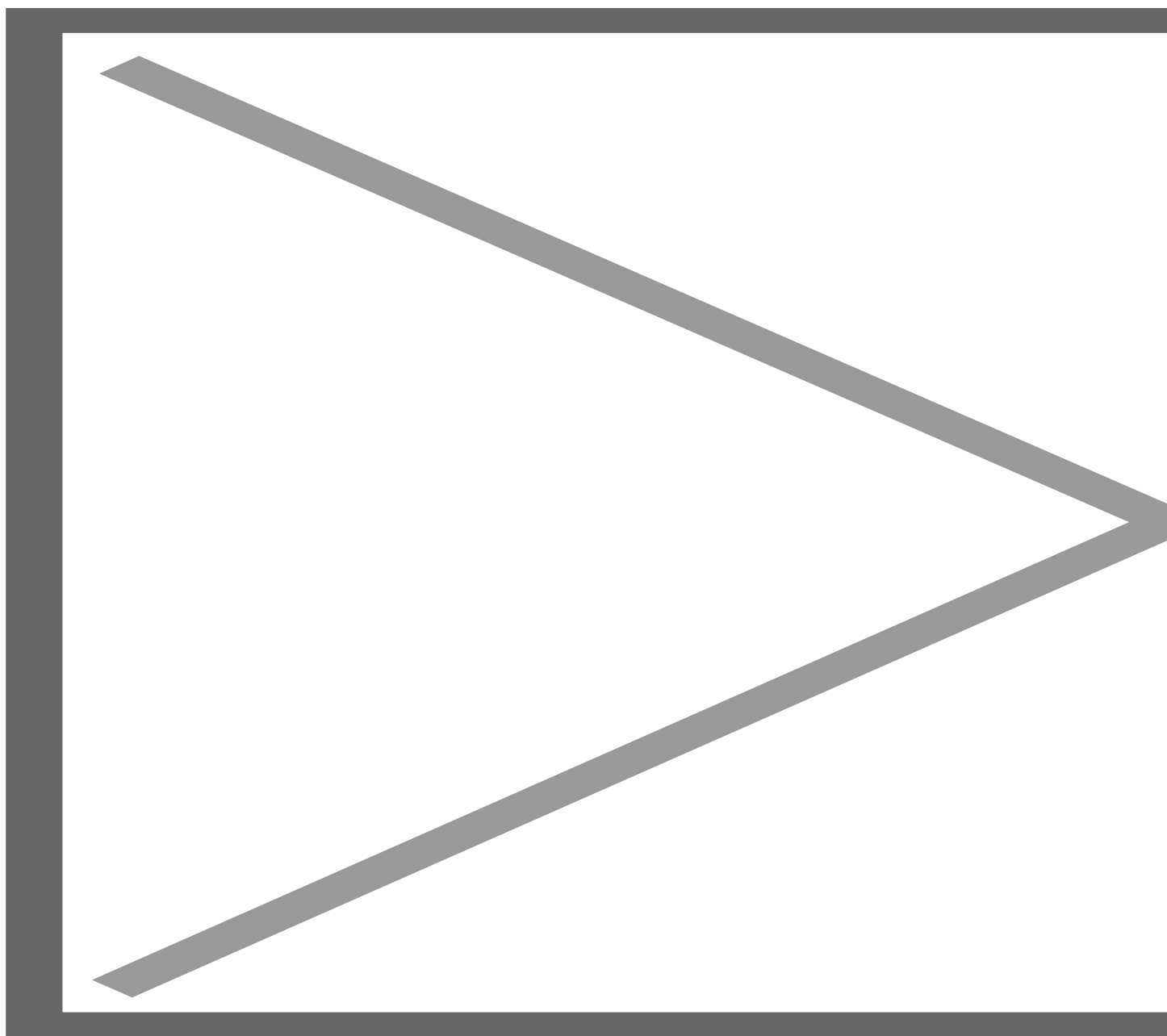
Гиперспектральная съемка проводилась в дневное время при солнечной и безоблачной погоде. Для съемки выбирались объекты наиболее освещённый солнцем, для чего камера располагалась с юго-восточной стороны от объекта на расстоянии 90 см. Фиксировалось отраженное электромагнитное излучение от объектов в диапазоне 450–950 нм. Каждый из пяти видов был представлен в эксперименте от 87 до 192 образцами (*Buglossoides arvensis* – 192, *Galium humifusum* – 87, *Lamium amplexicaule* – 114, *Setaria pumila* – 152, *Sinapis arvensis* – 156). Всего в исследовании был использован 701 образец. Образцы отбирались из группы случайным методом. Для каждого образца рассчитывалось среднее значение спектрального профиля. Полученные данные представлены в виде одного панхроматического изображения, размером 1000 × 1000 пикс. и 125-ти гиперспектральных изображений, размером 50 × 50 пикс. Пространственное разрешение полученных гиперспектральных данных – порядка 35 мм<sup>2</sup>.

Для оценки возможностей использования вегетационных индексов, рассчитанных по данным гиперспектральной съемки, для дистанционного выявления отдельных сорных видов растений было рассчитано 80 вегетационных индексов (ВИ) (Dmitriev et al., 2022) для каждого образца.

Для уменьшения ошибки измерения и удаления артефактов в спектральных данных на этапе предварительной обработки использовался фильтр Савицкого-Голея (длина 12 нм.). Обработка результатов гиперспектральной съемки проводилась в среде для статистических расчетов R (R Core Team), с использованием пакета *hsdar* (Lehnert et al.). Для сравнения средних значений вегетационных индексов был применен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), метод *Random forest (RF)* и *Principal component analysis (PCA)*.

## Результаты и обсуждение

Для определения вклада контролируемого в опыте фактора «вид» в значение 80 вегетационных индексов был использован однофакторный дисперсионный анализ. Сила влияния фактора (отношение значения девиаты фактора к общей девиате) 80-и вегетационных индексов представлена на рисунке 3. Наиболее пригодными для целей идентификации исследуемых видов вегетационные индексы, величина девиаты фактора «вид» которых превышает значения девиат случайных факторов (табл. 2, рис. 3). Это означает, что значение индекса в большей степени зависит от видовых особенностей, чем от других факторов.



*Рис. 3 – Сила влияния факторов по 80-и вегетационным индексам*

*Таблица 2 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа для величины CAR1*

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value
Вид	4	414403.00	103601.00	299.90
Внутригрупповая дисперсия	696	240447.00	345.00	

Примечание: Уровень значимости: 0 '\*\*\*'

Установлено, что влияние факторов «вид» на значения вегетационных индексов достоверно при уровне значимости, стремящемся к 0. Результаты дисперсионного анализа показывают, что ряд вегетационных индексов (CARI, MCARI, TGI, Boochs, DD, Carter6, TCARI2/OSAVI2, TCARI,

TCARI/OSAVI, Datt6, CIAInt, Gitelson, Maccioni, D1, TVI, MTVI) может быть использован для идентификации видов в комплексе *Galium humifusum*, *Sinapis arvensis*, *Buglossoides arvensis*, *Lamium amplexicaule* и *Setaria pumila*.

При использовании вероятностно-статистических методов имеется возможность установления точности полученных результатов и выводов. Однако они мало приспособлены для решения задач по идентификации объектов, особенно при большом количестве признаков. Поэтому в работе были использованы дополнительно методы анализа данных - Principal component analysis (PCA) и Random forest (RF).

Результаты PCA представлены на рисунке 4 и в таблицах 3 и 4. Следует отметить, что на первые две главные компоненты приходится 73,8 % дисперсии значений, факторы ограничиваются восемью компонентами (в соответствии с критерием Кайзера). Факторные нагрузки по всем выделенным компонентам представлены в таблице 4. Установлено, что для первой главной компоненты максимальные факторные нагрузки были у следующих вегетационных индексов: Datt3, EGFR, EGFN, EVI, CI, SR6, Carter4, Vogelmann, mSR2, NDVI2, MTCl, OSAVI2, Datt2, Maccioni, CI2, REP\_Li, GMI2, SR1, Vogelmann4, Vogelmann2, Datt, RDVI. Можно выделить индексы, имеющие одновременно факторную нагрузку на первую и вторую главные компоненты. Это Datt3, EGFR, EGFN, Gitelson2, EVI, CRI1, CRI3, CRI2, Green\_NDVI, GMI1, SR3, CI, NDVI3, DWSI4, Vogelmann, DDn, Datt4.

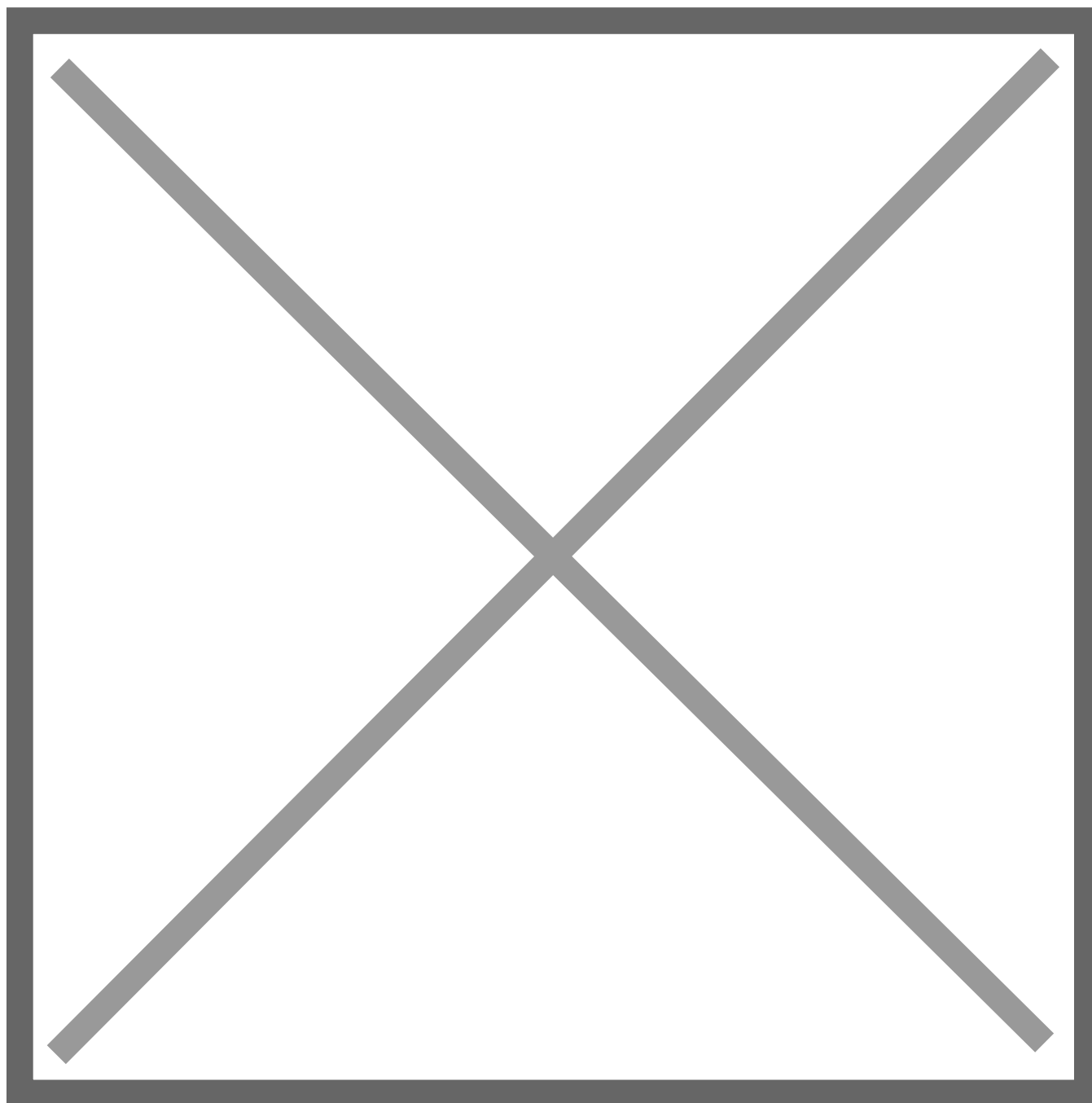


Рис. 4 – Проекция значений 80 вегетационных индексов *Galium humifusum* (1), *Sinapis arvensis* (2), *Buglossoides arvensis* (3), *Lamium amplexicaule* (4) и *Setaria pumila* (5) на первые две главные компоненты

Таблица 3 – Значение дисперсии, приходящейся на первую и вторую главные компоненты проекции значений 80 ВИ для *Galium humifusum*, *Sinapis arvensis*, *Buglossoides arvensis*, *Lamium amplexicaule* и *Setaria pumila*

Значение	Компонента
----------	------------

1	2	3	4	5	6	7
Среднеквадратическое отклонение	5.87	4.95	2.21	1.87	1.50	1.33
Доля дисперсии	0.43	0.31	0.06	0.04	0.03	0.02
Кумулятивная доля дисперсии	0.43	0.74	0.80	0.84	0.87	0.89

Таблица 4 - Факторные нагрузки на 8 значимых компонент для *Galium humifusum*, *Sinapis arvensis*, *Buglossoides arvensis*, *Lamium amplexicaule* и *Setaria pumila*

Факторы	Компонента						
	1	2	3	4	5	6	7
Boochs	0.15						
Boochs2	0.16	0.13	-0.11	0.13	-0.18		
CARI	0.14	0.11					
Carter2	-0.10	0.15					
Carter3	-0.15	0.10					
Carter4	0.19	0.10					
Carter5	0.14	-0.19	-0.19				
Carter6	0.13	0.11	0.14				
CI	-0.20	0.19	-0.21	-0.12	0.33	0.24	0.17
CI2	-0.18						



CIInt	0.12	0.12	0.15				
CRI1	-0.12	-0.31	-0.11	0.13	0.14		
CRI2	-0.10	-0.31	0.12	0.15			
CRI3	0.11	-0.31	-0.12	0.14			
CRI4	0.16	0.11					
D1	-0.13	-0.19	0.26	-0.10	0.26	-0.26	-0.28
D2	0.14	-0.11	0.11	-0.16	0.14	0.16	0.10
Datt	-0.17	0.11	0.15	0.15	0.12	0.26	
Datt2	-0.18	0.12	0.11	0.11	0.22		
Datt3	-0.39	0.40	0.36	-0.44	0.24	0.28	0.19
Datt4	-0.16	0.19					
Datt5	-0.15	0.13	0.15	0.10			
Datt6	-0.15	-0.11					
DD	-0.16						
DDn	-0.14	-0.22					
DPI	-0.13	-0.12	-0.39	0.61	0.29	0.14	-0.33
DWSI4	0.14	-0.24	-0.12	0.14			
EGFN	0.31	0.26	-0.28	-0.18	-0.29	0.15	0.19
EGFR	0.32	0.27	-0.27	-0.18	-0.27	0.14	0.20
EVI	-0.28	0.17	-0.91	-0.15	0.17		

GI	0.15	-0.11	-0.20	-0.15	0.14		
Gitelson	-0.12	-0.12	-0.11				
Gitelson2	0.15	0.35	-0.46	-0.59	0.29		
GMI1	-0.13	0.27	0.11	-0.12			
GMI2	-0.18						
Green_NDVI	-0.13	0.28	0.11	-0.11			
Maccioni	-0.18	0.14					
MCARI	0.14	0.10	-0.14	0.12			
MCARI2	0.15	0.16	0.11				
MPRI	0.13	0.22					
MSAVI	0.15	-0.12	-0.19				
mSR2	-0.19						
MTCI	-0.19	0.14					
MTVI	0.16						
NDVI	0.15	-0.10					
NDVI2	-0.19						
NDVI3	-0.14	0.24	0.13				
OSAVI	0.15	-0.12	-0.13				
OSAVI2	-0.19						
PARS	0.15	-0.11	0.10	0.17	0.10		

PRI	-0.12	0.12	-0.52	-0.12	0.15	-0.11	0.24
PRI_norm	-0.12	0.11	0.29	0.14	0.11	0.11	-0.20
PRI_CI2	-0.13	0.14	-0.52	-0.10	0.11	-0.14	0.33
PSRI	-0.13	0.12	0.27	0.11	0.15	0.20	
PSSR	0.15	-0.11	0.16				
PSND	0.14	-0.12	0.13	0.11			
RDVI	0.17						
REP_Li	-0.18	0.15	0.15				
SAVI	0.15	-0.11	-0.13				
SPVI	0.16	0.10					
SR	0.15	0.14					
SR1	-0.18						
SR2	0.12	-0.13	0.11				
SR3	-0.13	0.27	0.11	-0.12			
SR4	0.15	-0.18	-0.17	0.11			
SR5	-0.16	0.16	0.14				
SR6	-0.19						
SR8	-0.14	0.11	0.15	-0.12	-0.11		
Sum_Dr1	0.16						
Sum_Dr2	0.16						

TCARI	0.14	0.10					
TCARI_OSAVI	0.12	0.13	0.13				
TCARI2	0.16	0.15					
TCARI2_OSAVI2	0.14	0.10	0.12				
TGI	0.15						
TVI	0.16						
Vogelmann	-0.19	0.18	0.12				
Vogelmann2	0.17	0.12	-0.16	0.14	-0.11	-0.17	
Vogelmann3	-0.10	0.13	0.11	-0.13	-0.16	0.16	-0.26
Vogelmann4	0.18	0.12	-0.15	0.14	-0.11	-0.15	

В анализе *Random forest* использовано 500 деревьев (рис. 5). Ошибка матрицы значений 80-ти вегетационных индексов пяти исследуемых видов достаточно низкая – 7.99 %, что свидетельствует об их хорошей дифференциации методом RF (таблица 5).

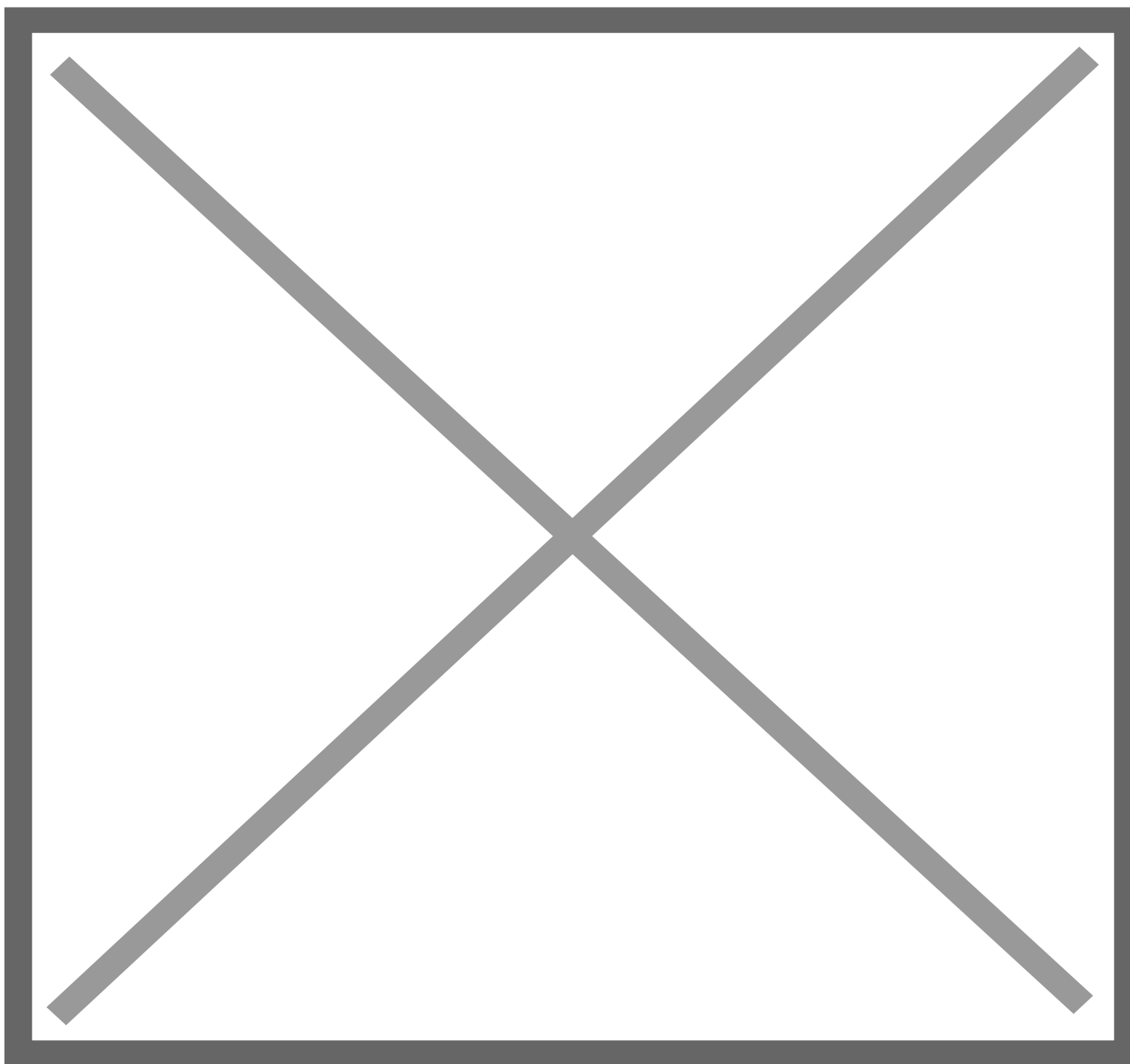


Рис. 5 – Ошибка матрицы *Random forest* в зависимости от количества деревьев

Таблица 5 – Частоты ошибок матрицы RF значений 80-и вегетационных индексов для *Galium humifusum*, *Sinapis arvensis*, *Buglossoides arvensis*, *Lamium amplexicaule* и *Setaria pumila*

Confusion matrix	<i>Galium humifusum</i>	<i>Sinapis arvensis</i>	<i>Buglossoides arvensis</i>	<i>Lamium amplexicaule</i>	<i>Setaria pumila</i>
<i>Galium humifusum</i>	74	0	3	2	3
<i>Sinapis arvensis</i>	0	146	6	0	0
<i>Buglossoides arvensis</i>	6	10	173	4	1
<i>Lamium amplexicaule</i>	5	0	6	107	3
<i>Setaria pumila</i>	2	0	4	1	145
class.error	14.94 %	6.41 %	9.90 %	6.14 %	4.61 %

Метод RF, как PCA и ANOVA, также позволяет определить группу вегетационных индексов, наиболее подходящую для идентификации исследуемых сорных видов. На рисунке 6 вегетационные индексы расположены в зависимости от их влияния на значение ошибки (Mean Decrease Accuracy) и критерия Gini.

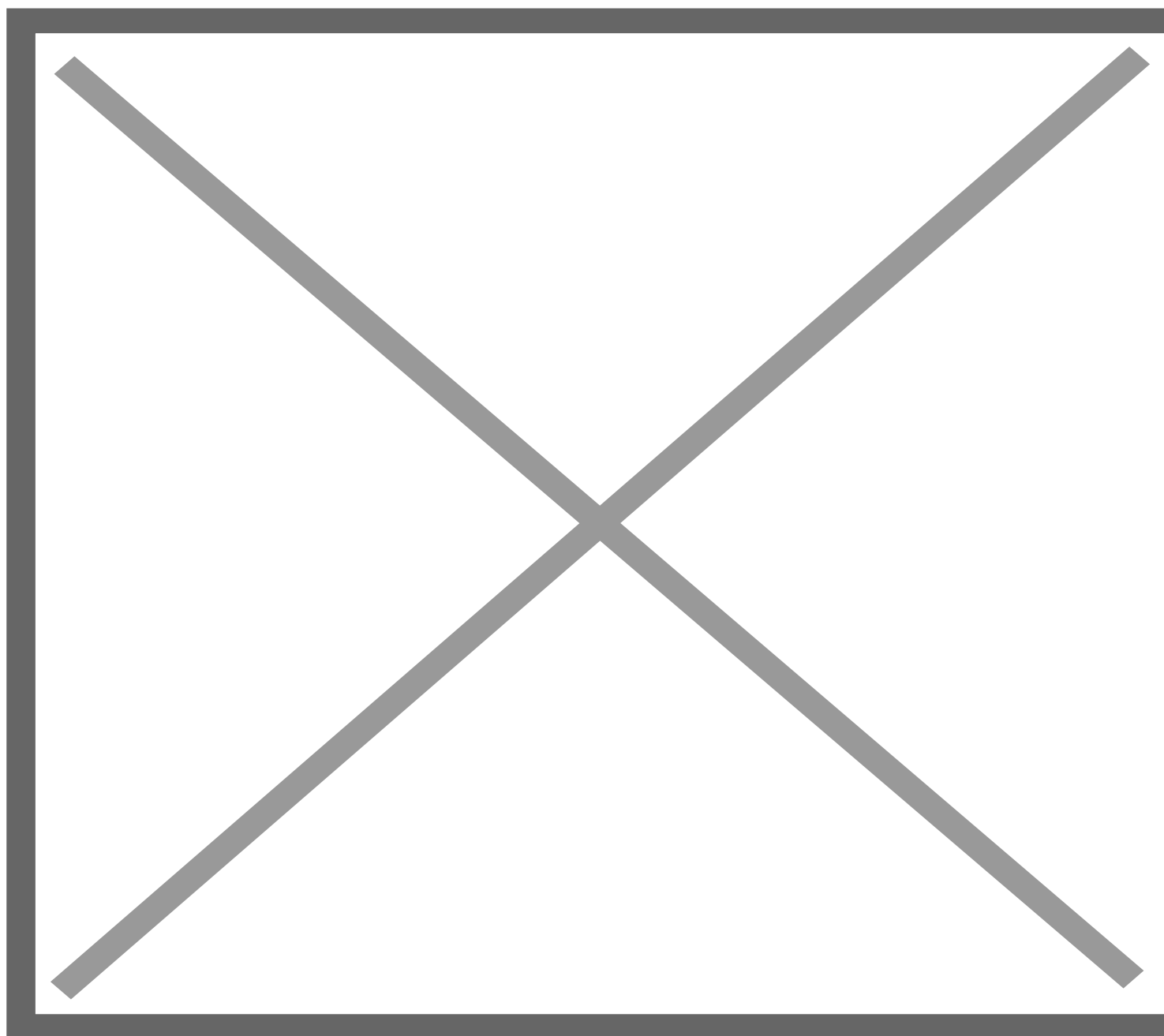


Рис. 6 – Среднее снижение точности и среднее снижение индекса Джини в зависимости от вегетационных индексов при идентификации видов *Galium humifusum*, *Sinapis arvensis*, *Buglossoides arvensis*, *Lamium amplexicaule* и *Setaria pumila*

### Заключение

Методы ANOVA, PCA и RF позволили выделить ряд вегетационных индексов, чье варьирование значительно зависит от принадлежности образца к виду. Полученные результаты подтверждают возможность использования гиперспектральных сенсоров для идентификации сорных видов растений в агроценозах озимой пшеницы по данным гиперспектральной съемки с помощью вегетационных индексов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (программа «УМНИК», договор № 660ГУЦЭС8-Д3/63811 от 09.12.2020 г.)

## Литература

1. Лаптиев А.Б. Сорная растительность в севообороте и совершенствование использования пестицидов // Земледелие, 2011. № 5. С. 45–48.
2. Оказова З. П. Вредоносность сорных растений посевов озимой пшеницы в лесостепной зоне Северного Кавказа // Известия Горского государственного аграрного университета, 2015. № 4. С. 70–73.
3. Павлюшин В.А., Долженко В.И., Шпанев А.М., Лаптиев А.Б. и др. Интегрированная защита озимой пшеницы // Защита и карантин растений, 2015. №5. С. 37–71.
4. Токарев Е.В., Хилевский В.А., Токарев Е.В., Маханькова Т.А. Защита пшеницы озимой новым комбинированным гербицидом Спикер, КЭ в степной зоне Северного Кавказа // Наука: прошлое, настоящее, будущее. Сборник статей по материалам VII Международной научно-практической конференции (15 августа 2015 г.). Ч. 2 / Уфа, «АЭТЕРНА», 2015. С. 30–33.
5. Aasen H., Burkart A., Bolten A., Bareth G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance // JPRS, 2015. 108. Pp. 245–259.
6. Bareth G., Aasen H., Bendig J., Gnyp M.L., Bolten A., Jung A., Michels R., Soukkamäki J. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: Spectral comparison with portable spectroradiometer measurements. Photogramm // Fernerkundung, Geoinf., 2015. Pp. 69–79.
7. Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Kupriushkin D.P., Lysenko V.S., Rajput V.D., Ignatova M.A., Tarik E.P., Kapralova O.A., Tokhtar V.K., Singh A.K., Minkina T.M., Varduni T.V., Sharma M., Taloor A.K., Thapliyal A. Identification of species of the genus Acer L. using vegetation indices calculated from the hyperspectral images of leaves // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022, 100679. <https://doi.org/10.1016/j.rsase>
8. Lehnert L.W., Meyer H., Obermeier W.A., Silva B., Regeling B., Thies B., Bendix J. Hyperspectral Data Analysis in R: The hsdar Package // J. of Stat. Softw., 2019. 89 (12). Pp. 1-23. <https://doi.org/10.18637/jss.v089.i12>.

## References

1. Laptiev, A.B. Weeds in crop rotation and improving the use of pesticides / A. B. Laptiev // Agriculture, 2011. No. 5. Pp. 45–48.
2. Okazova Z.P. Harmfulness of weeds of winter wheat crops in the forest-steppe observer of the North Caucasus // Proceedings of the Gorsky State Agrarian University, 2015. No. 4. Pp. 70–73.
3. Pavlyushin V.A., Dolzhenko V.I., Shpanev A.M., Laptiev A.B. et al. Integrated protection of winter wheat // Protection and quarantine of plants, 2015. No. 5. Pp. 37–71.
4. Tokarev E.V., Khilevsky V.A., Makhankova T.A. Protection of winter wheat with a new combined herbicide Speaker, KE in the steppe protection of the North Caucasus // Science: past, present, future. Collection of articles based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference (August 15, 2015): At 2 pm Part 2 / Ufa, "AETERNA", 2015. Pp. 30–33.
5. Aasen H., Burkart A., Bolten A., Bareth G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. JPRS., 2015. 108. Pp. 245–259.
6. Bareth G., Aasen H., Bendig J., Gnyp M.L., Bolten A., Jung A., Michels R., Soukkamäki J. Low-weight and UAV-based hyperspectral full-frame cameras for monitoring crops: Spectral comparison with portable spectroradiometer measurements. Photogramm // Fernerkundung, Geoinf., 2015. Pp. 69–79.
7. Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Kupriushkin D.P., Lysenko V.S., Rajput V.D., Ignatova M.A., Tarik E.P., Kapralova O.A., Tokhtar V.K., Singh A.K., Minkina T.M., Varduni T.V., Sharma M., Taloor A.K., Thapliyal A., Identification of species of the genus Acer L. using vegetation indices calculated from the hyperspectral images of leaves // Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2022, 100679. <https://doi.org/10.1016/j.rsase> .
8. Lehnert L.W., Meyer H., Obermeier W.A., Silva B., Regeling B., Thies B., Bendix J. Hyperspectral Data Analysis in R: The hsdar Package. // J. of Stat. Softw., 2019. 89 (12). Pp. 1-23. <https://doi.org/10.18637/jss.v089.i12> .