

УДК: 10.18522/2308-9709-2022-39-1
<https://new.jbks.ru/archive/issue-39/article-1>

Сезонная динамика NDVI у видов клена

[Дмитриев П. А.¹](#), [Козловский Б. Л.²](#), [Вардуни Т. В.³](#), [Федоринова О. И.⁴](#), [Игнатова М. А.⁵](#), [Дмитриева А. А.⁶](#)

1. Старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия НИИ Биологии ЮФУ.
2. Место работы (полностью): Ботанический сад Южного федерального университета
3. Директор ботанического сада ЮФУ
4. Ботанический сад Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета
5. Должность: Биолог
6. Ботанический сад Южного федерального университета

В работе была предпринята попытка с помощью гиперспектральной камеры в контролируемых условиях лабораторного эксперимента получить уникальные кривые сезонной динамики значений NDVI, позволяющие идентифицировать виды клена. Объектами исследования послужили образцы *Acer campestre* L., *Acer negundo* L. и *Acer saccharinum* L. Съемка листьев кленов проводилась в лабораторных условиях с помощью гиперспектральной камеры Cubert UHD-185 при искусственном освещении. Для контроля результатов осуществлялось определение содержания хлорофилла а спектрофотометрическим методом. Исследования проводили в течение периода вегетации кленов от фенологической фазы «полное разветвление листьев» до фенологической фазы «начало осеннего расцветивания листьев». Установлено, что сезонная динамика значения NDVI сходна с динамикой хлорофилла а, рассчитанной спектрометрическим методом. Эмпирические линии регрессии величины NDVI у всех трех видов клена в большинстве сроков съемки синхронны, в особенности в зоне максимума и минимума. Вместе с тем разница между видами кленов по NDVI выражена не так резко, как у хлорофилла а, хотя в большинстве сроков съемок значение NDVI у *A. campestre* выше, чем у остальных двух видов кленов. Предполагаем, что NDVI signature не может быть использована для разделения видов рода *Acer*. Однако, для идентификации родов, значительно различающихся по фенологии, использование NDVI signature является вполне возможной.

Введение

Метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием спектральных сенсоров находит все большее применение, особенно в сельском хозяйстве. В настоящее время широко используются дистанционно измеряемые вегетационные индексы (ВИ). Ряд исследований показали, что сезонная динамика ВИ значительно коррелирует с официальной статистикой урожайности сельскохозяйственных культур (Bégué et al., 2010; Doraiswamy et al., 2007; Ferencz et al., 2004; Meroni et al., 2013; Duncan et al., 2015). Наиболее часто для сельскохозяйственного картографирования и мониторинга используется нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Уже в первых работах (Fischer, 1975; Pinter et al., 1981; Mahey et al., 1993; Dubey et al., 1994) были обнаружены значимые линейные зависимости между урожайностью пшеницы и значением NDVI. Этот ВИ является показателем количества фотосинтетически активной биомассы.

Распознавание сельскохозяйственных культур, определение их состояния и урожайности основывается на интерпретации сезонной кривой значений NDVI. Форма этой кривой значительно зависит от фенологии, выращиваемых растений. Поскольку сельхоз культуры, как правило, значительно различаются по фенологии, для них есть возможность получить уникальную кривую NDVI, т. е. NDVI signature (NDVI подпись).

Для лесного хозяйства и зеленого строительства большое значение имеет идентификация древесных растений на больших пространствах. В последние годы неуклонно растет число работ, посвященных выявлению видовой принадлежности образцов древесных растений методами дистанционного зондирования (Dainelli et al., 2021; Dmitriev et al., 2022). Однако полученные на настоящий момент результаты следует признать спорными.

Цель работы – попытка в контролируемых условиях лабораторного эксперимента получить уникальные кривые сезонной динамики значений NDVI (NDVI signature) для видов *Acer*.

Материалы и методы

Исследование проводилось в Ботаническом саду Южного федерального университета в 2021 году. Климат Ростовской области умеренно-континентальный, засушливый. Среднегодовое количество осадков составляет 548 мм, большая часть осадков выпадает в безморозный период. Лето жаркое, средняя температура июля + 22 ... + 23 °С., максимум +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.

Объектами исследования послужили образцы клена полевого (*Acer campestre* L.), клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) и клена серебристого (*Acer saccharinum* L.). Все опытные растения имели близкий возраст, находились в одной стадии онтогенеза (молодые генеративные особи), произрастают в сходных условиях в парке ботанического сада ЮФУ, расположенном в пойме реки Темерник. Каждый из трех видов был представлен в эксперименте тремя образцами. С каждого образца по кругу с их кроны с основания побега текущего года отбиралось 7 листьев. Съемка собранных листьев проводилась в лабораторных условиях с помощью гиперспектральной камеры Cubert UHD-185 (Bareth et al., 2015.; Aasen et al., 2015) в условиях искусственного освещения. Лист дерева размещался на черной кальке. Объектив камеры располагался на расстоянии 70 см от листовой пластинки и направлялся перпендикулярно ей. Каждый лист снимался пять раз. Каждый снимок представлен в виде одного панхроматического изображения, размером 1000 × 1000 пикс. и 125-ти гиперспектральных изображений, размером 50 × 50 пикс. Пространственное разрешение полученных гиперспектральных данных составляло примерно 35 мм². На основании полученных спектральных линий рассчитывался один из вариантов «узкоспектрального» NDVI:

$NDVI = (R800 - R680) / (R800 + R680)$, где Rxxx - отражение в "xxx" области спектра.

Для контроля результатов осуществлялось определение содержания хлорофилла *a* спектрофотометрическим методом (применялся спектрофотометр КФК-3). Для экстракции пигментов с разных листьев делалось семь высечек с помощью пробочного сверла диаметром 10 мм, которые затем растирались в ступке с добавлением кварцевого песка и CaCO₃ с неразбавленным ацетоном. Каждая проба измерялась трижды. Результат усреднялся. Содержание пигментов в листьях рассчитывали по формулам, приведенным в практикуме по физиологии растений (Третьяков, 1982).

Исследования проводили в течение периода вегетации кленов от фенологической фазы «полное разворачивание листьев» до фенологической фазы «начало осеннего расцветивания листьев» - с 12 мая по 19 октября. При построении графиков и диаграмм календарные даты были переведены в непрерывный ряд чисел, где: 1 - 13.05.2021; 2 - 19.05.2021; 3 - 04.06.2021; 4 - 18.06.2021; 5 - 25.06.2021; 6 - 02.07.2021; 7 - 09.07.2021; 8 - 16.07.2021; 9 - 23.07.2021; 10 - 06.08.2021; 11 - 24.08.2021; 12 - 27.08.2021; 13 - 03.09.2021; 14 - 10.09.2021; 15 - 16.09.2021; 16 - 24.09.2021; 17 - 01.10.2021; 18 - 08.10.2021; 19 - 22.10.2021.

Съемка гиперспектральной камерой и определение фотосинтетических пигментов с помощью спектрофотометра проводилась с интервалом в 7-10 дней.

Результаты и обсуждение

Сезонная динамика концентрации хлорофилла *a* в листьях *A. campestre*, *A. saccharinum* и *A. negundo*, определенная спектрофотометрическим методом, представлена на рисунке 1. Эмпирические значения пигментов на графиках сопровождаются доверительным интервалом при $P=0,95$. У всех трех видов клена содержание хлорофилла *a* достигает своего максимума в конце 3-й декады июня, после чего начинается плавное снижение содержания пигмента вплоть до середины 2-й декады сентября, после которой происходит резкое падение его концентрации.

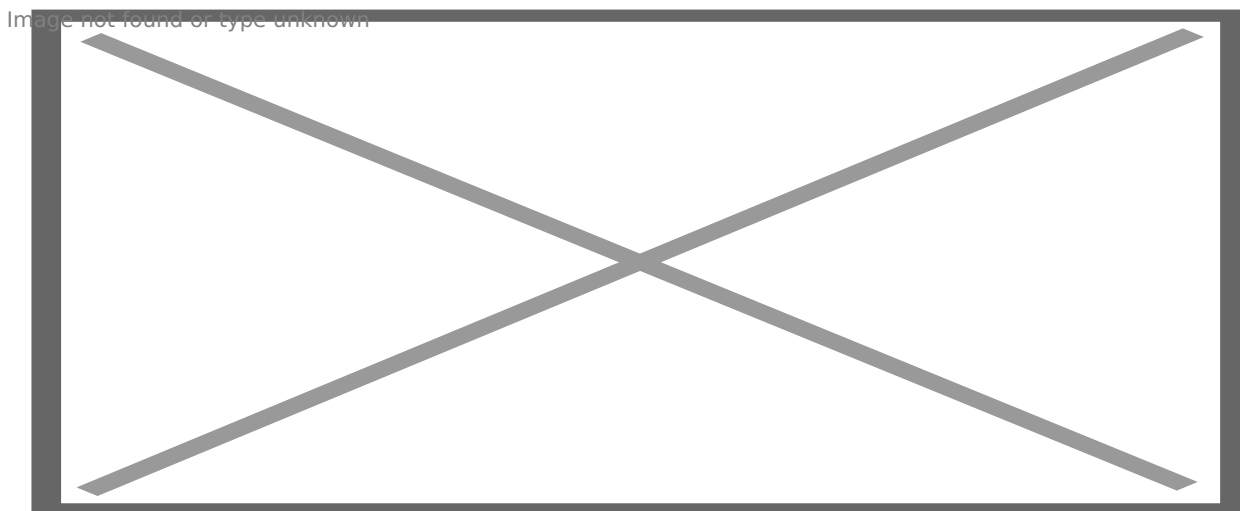


Рис. 1 – Эмпирические линии регрессии сезонной динамики фотосинтетических пигментов кленом

Качественных различий в сезонной динамике концентрации хлорофилла *a* для всех трех видов кленов нет – все эмпирические линии регрессии в большинстве сроков отбора проб были синхронны. Однако уровень концентрации пигмента у *A. campestre* существенно превышает таковой у *A. saccharinum* и *A. negundo*. Уровень содержания хлорофилла *a* у *A. saccharinum* и *A. negundo* в течение всего сезона различался не существенно.

Сезонная динамика величины NDVI у всех видов клена во многие сроки съемки синхронна, в особенности в зоне максимума и минимума (рис. 2). Значения ВИ, рассчитанные по отдельным спектральным профилям, колеблются в интервале от 0,50 до 0,87. Наибольшее среднее значение NDVI зафиксировано в начале вегетации кленов и составляет 0,76, минимальное в начале октября – 0,53–0,57. В абсолютных значениях разница незначительная, однако в относительных это около 28%.

Сравнение сезонной динамики концентрации хлорофилла *a* с сезонной динамикой значения NDVI дала следующие результаты. Динамика значения NDVI в определенной мере сходна с динамикой содержания хлорофилла *a*, полученной спектрометрическим методом. В начале вегетации отмечается пик значений, затем наступает стационарная фаза и с конца сентября происходит плавное снижение. При этом пик значений NDVI фиксируется более чем на месяц раньше, чем пик концентрации хлорофилла *a*. Падение значений осенью происходит синхронно. Это хорошо видно на диаграммах размаха (рис. 2) и эмпирических линиях регрессии средних значений NDVI (рис. 3).

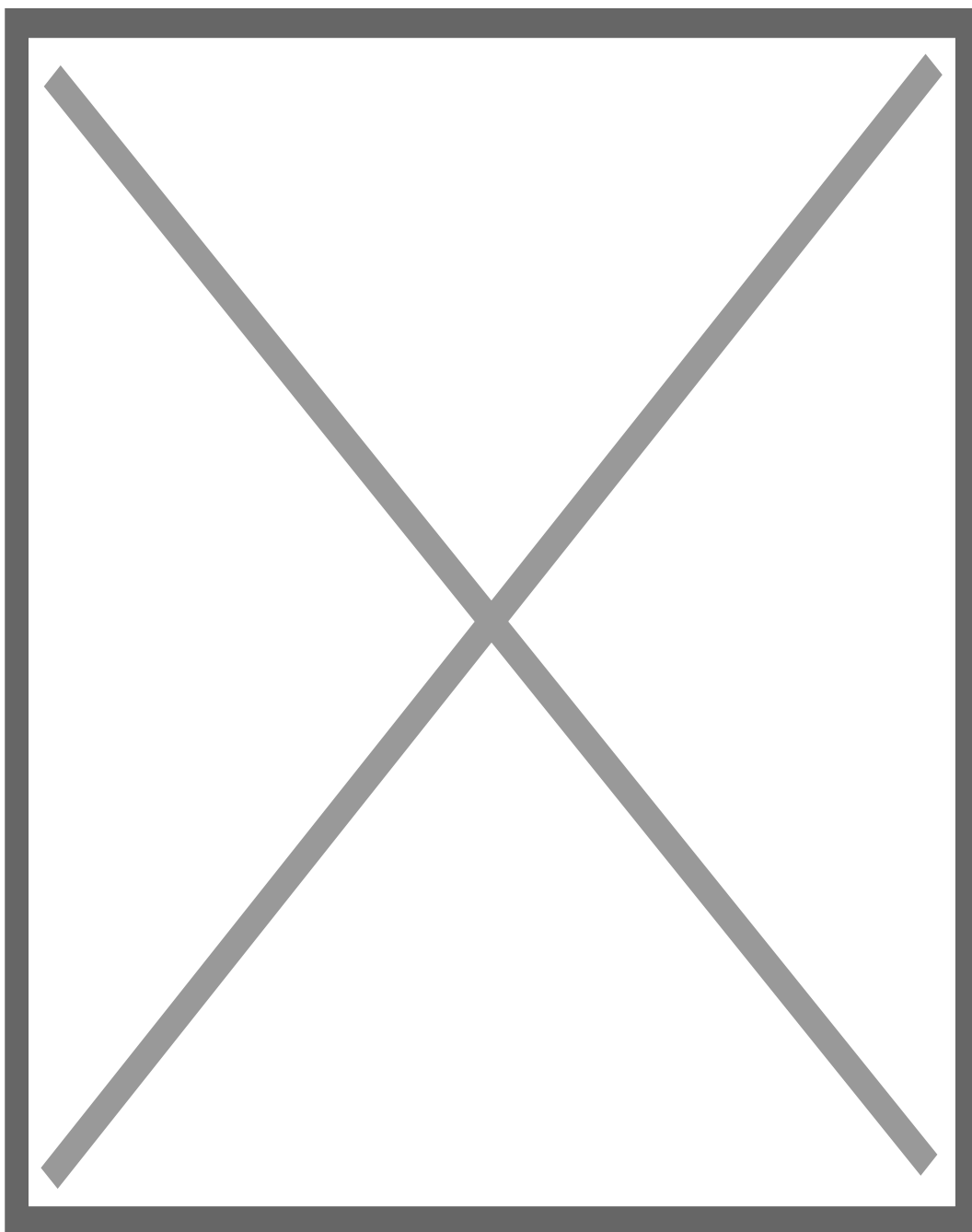


Рис. 2 - Диаграммы размаха значений NDVI кленов

Вместе с тем разница между видами кленов выражена не так резко (как это наблюдается на концентрации хлорофилла *a*), хотя в большинстве сроков съемок значение NDVI у *A. campestre* выше, чем у остальных двух видов кленов (рис. 3).



Рис. 3 – Сезонная динамика значений NDVI кленов

Отсутствие существенной разницы между видами кленов в сезонной динамике NDVI может быть связано с рядом причин.

Основной причиной следует считать эффект насыщения NDVI при высоком значении индекса площади листа (LAI), примерно 4 (Wang et al., 2005). В данном случае это означает, что значение этого ВИ не будет различаться у клена с высоким содержанием хлорофилла и у клена с очень высоким содержанием пигмента. Косвенно это подтверждается очень высокими средними значениями NDVI – от 0,53 до 0,76.

Фенологические циклы у *A. campestre*, *A. saccharinum* и *A. negundo*, после фазы «полное разворачивание листьев» очень близки (Козловский и др., 2020). Возможно, по этой причине NDVI signature не может быть использована для разделения видов рода *Acer*. Для этого на первом этапе надо провести расчеты других ВИ. Однако, для идентификации родов, значительно различающихся по фенологии (например, по продолжительности вегетации), использование NDVI подписи является вполне возможной.

Очень малый диапазон шкалы NDVI – от -1 до +1, причем участок, соответствующий растениям, считается от 0,25 до 1.

Эффект, когда основное отражение приходится на верхний ряд клеток столбчатой паренхимы. Губчатая паренхима, также содержащая фотосинтетические пигменты в этом процессе участия не принимает. Поэтому прямая корреляции между содержанием пигментов и значением NDVI невозможна.

Заключение

Сезонная динамика значения NDVI сходна с динамикой хлорофилла *a*, рассчитанной спектрометрическим методом. Эмпирические линии регрессии величины NDVI у всех трех видов клена в большинстве сроков съемки синхронны, в особенности в зоне максимума и минимума, т. е. имеют одинаковую тенденцию. Вместе с тем разница между видами кленов по NDVI выражена не так резко, как у хлорофилла *a*, хотя в большинстве сроков съемок значение NDVI у *A. campestre* выше, чем у остальных двух видов кленов. Предполагаем, что NDVI signature не может быть использована для разделения видов рода *Acer*. Однако, для идентификации родов, значительно различающихся по фенологии, использование NDVI signature является вполне возможной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (программа «УМНИК», договор №532ГУЭС8-D3/62145 от 05.10.2020 г.)

Литература

1. Козловский, Б. Л., Куропятников М. В., Федоринова О. И. Фенология древесных интродуцентов Ботанического сада ЮФУ. Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет. – 2020, 228 с. ISBN 978-5-9275-3553-8.
2. Третьякова Н. Н. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие для студентов с.-х. высш. учеб. заведений. М.: Колос, 1982. – 272 с.
3. 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.
4. 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.
5. Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F., Siegmund, B. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI // Remote Sens., 2010. 31. – pp. 5391–5407. <https://doi.org/10.1080/01431160903349057>.
6. Dainelli R., Toscano P., Di Gennaro S. F., Matese A. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing - a Systematic Review. Part II: Research Applications // Forests, 2021. 12, 4. – P. 397.
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.2021.100679>.
8. Doraiswamy, P.C., Akhmedov, B., Beard, L., Stern, A., Mueller, R. Operational prediction of crop yields using modis data and products // Workshop Proceedings: Remote Sensing Support to Crop Yield Forecast and Area Estimates. 2007. –pp.45–49.
9. Dubey, R. P., Ajwani, N., Kalubarme, M. H., Sridhar, V. N., Navalgund, R. R., Mahey, R. K., et al. Preharvest wheat yield and production estimation for the Punjab, India // International Journal of Remote Sensing., 1994. 15. – pp. 2137–2144.
10. Duncan, J.M.A., Dash, J., Atkinson, P.M. The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes // Front. Environ. Sci., 2015. 3. – pp.1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00056>.
11. Ferencz, C., Bognár, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, G., Molnár, G., Pásztor, S.Z., Steinbach, P., Székely, B., Ferencz, O.E., Ferencz-Árkos, I. Crop yield estimation by satellite remote sensing // Remote Sens., 2004. 25. – pp. 4113–4149. <https://doi.org/10.1080/01431160410001698870>.
12. Fischer, R. A. Yield potential in dwarf spring wheat and the effect of shading // Crop Science, 1975. 15. – 607–613.
13. Mahey, R. K., Singh, R., Sidhu, S. S., Narang, R. S., Dadhwal, V. K., Parihar, J. S., et al. Preharvest state-level wheat acreage estimation using IRS-IA LISS-I data in Punjab (India) // International Journal of Remote Sensing. 1993. 14. – pp. 1099–1106
14. Meroni, M., Marinho, E., Sghaier, N., Verstrate, M., Leo, O. Remote sensing based yield estimation in a stochastic framework — case study of durum wheat in Tunisia // Remote Sens., 2013. 5. – pp. 539–557. <https://doi.org/10.3390/rs5020539>.
15. Pinter, P. J., Jackson, R. D., Idso, S. B., & Reginato, R. J. Multidate spectral reflectances as predictors of yield in water stressed wheat and barley // International Journal of Remote Sensing., 1981. 2. – pp.43–48.
16. Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site Remote Sensing of //Environment., 2005. 94. – Pp. 244–255.

References

1. Kozlovsky, B. L., Kurpyatnikov M. V., Fedorinova O. I. Phenology of tree introducers of the Botanical Garden of the Southern Federal University. Rostov-on-Don - Taganrog: Southern Federal University. - 2020, 228 p. ISBN 978-5-9275-3553-8.
2. Tretyakova N. N. Practicum on plant physiology : textbook. manual for students of higher secondary school. studies. institutions . M.: Kolos - 1982, 272 p.
3. 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.
4. 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.
5. Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F., Siegmund, B. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI . Remote Sens. – 2010, 31, pp. 5391–5407.

<https://doi.org/10.1080/01431160903349057>.

6. Dainelli R., Toscano P., Di Gennaro S. F., Matese A. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing - a Systematic Review. Part II: Research Applications . *Forests*. – 2021, 12, 4, P. 397.
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.2021.100679>.
8. Doraiswamy, P.C., Akhmedov, B., Beard, L., Stern, A., Mueller, R. Operational prediction of crop yields using modis data and products. . *Workshop Proceedings: Remote Sensing Support to Crop Yield Forecast and Area Estimates*. – 2007, pp.45–49.
9. Dubey, R. P., Ajwani, N., Kalubarme, M. H., Sridhar, V. N., Navalgund, R. R., Mahey, R. K., et al. Preharvest wheat yield and production estimation for the Punjab, India. . *International Journal of Remote Sensing*. – 1994, 15, pp. 2137–2144.
10. Duncan, J.M.A., Dash, J., Atkinson, P.M. The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes. . *Front. Environ. Sci*. – 2015, 3, pp.1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00056>.
11. Ferencz, C., Bognár, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, G., Molnár, G., Pásztor, S.Z., Steinbach, P., Székely, B., Ferencz, O.E., Ferencz-Árkos, I. Crop yield estimation by satellite remote sensing .*Remote Sens*. – 2004, 25, pp. 4113–4149. <https://doi.org/10.1080/01431160410001698870>.
12. Fischer, R. A. Yield potential in dwarf spring wheat and the effect of shading. . *Crop Science*. – 1975, 15, 607–613.
13. Mahey, R. K., Singh, R., Sidhu, S. S., Narang, R. S., Dadhwal, V. K., Parihar, J. S., et al. Preharvest state-level wheat acreage estimation using IRS-IA LISS-I data in Punjab (India). . *International Journal of Remote Sensing*. – 1993, 14, pp. 1099–1106
14. Meroni, M., Marinho, E., Sghaier, N., Verstrate, M., Leo, O. Remote sensing based yield estimation in a stochastic framework — case study of durum wheat in Tunisia . *Remote Sens*. – 2013, 5, pp. 539–557. <https://doi.org/10.3390/rs5020539>.
15. Pinter, P. J., Jackson, R. D., Idso, S. B., & Reginato, R. J. Multidate spectral reflectances as predictors of yield in water stressed wheat and barley. . *International Journal of Remote Sensing*. – 1981, 2, pp.43–48.
16. Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. . *Remote Sensing of Environment*. – 2005, 94, pp. 244–255.