

Дискриминация хвойных и лиственных листьев деревьев и кустарников от декоративно-искусственных материалов методом оптической спектроскопии диффузного отражения света

© Ю.В. Мамелин, Г.Ф. Копытов, В.Ю. Бузько

Кубанский государственный университет (КубГУ),
350040 Краснодар, Россия

e-mail: mamelin@bk.ru

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.

В окончательной редакции 24.10.2019 г.

Принята к публикации 05.11.2019 г.

Проведено сравнение спектров диффузного отражения света от зеленых хвойных и лиственных листьев деревьев и кустарников, произрастающих на территории Краснодарского края, со спектрами диффузного отражения света от зеленых синтетических декоративно-искусственных листьев и различных камуфляжных материалов. Предложено использовать вегетационные индексы „зелености“ для дискриминации хвойных и лиственных листьев деревьев и кустарников от декоративно-искусственных материалов методом оптической спектроскопии диффузного отражения.

Ключевые слова: спектроскопия диффузного отражения света, коротковолновое ИК излучение, SWIR, NDVI, Северо-Западный Кавказ.

DOI: 10.21883/OS.2020.02.48981.288-19

Введение

В результате многолетнего опыта исследований в области дистанционного зондирования местности [1–5] мировым научным сообществом, включая C.F. Jordan, J.W. Rouse, C.J. Tucker, Y.J. Kaufman, D. Tanre, A.R. Huete, H. Liu, R.D. Jackson, были разработаны основные вегетационные индексы (VIs) [6–8] для качественной и количественной оценки растительного покрова. Вегетационные индексы представляют собой комбинации коэффициентов поверхностного отражения на двух или более длинах волн и предназначены для выделения определенного свойства растения. Использование узкополосных вегетационных индексов „зелености“ (narrow-band greenness) [9–12], рассчитываемых по значениям коэффициентов диффузионного отражения в узкой области инфракрасного склона (red edge), в сочетании с современными технологиями мультиспектральных и гиперспектральных камер позволяет осуществлять быстрый сбор данных для точечного земледелия [13] и оперативный мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий [14] для повышения урожайности. Также в настоящее время, основываясь на вегетационных индексах, активно ведутся исследования спектральных сигнатур хвойных и лиственных деревьев, кустарников [15–18] и различных растений [19] с целью их классификации [20].

Исследование спектральных свойств листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края до сих пор не было проведено. Целью данной работы является получение оптических характеристик диффузного отражения света от листьев лиственных и хвойных деревьев и кустарников Краснодарского края,

декоративно-искусственных листьев и зеленых камуфляжных тканей, а также их анализ и сравнение. Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи.

Исследовать в лабораторных условиях оптические характеристики диффузного отражения света в диапазоне длин волн от 350 до 900 nm от свежесобранных зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края.

Исследовать оптические характеристики диффузного отражения света от зеленых декоративно-искусственных листьев и зеленых камуфляжных тканей в том же диапазоне длин волн.

Рассмотреть возможность отличать зеленые листья хвойных и лиственных деревьев и кустарников от декоративно-искусственных листьев с помощью методов машинного зрения, опирающихся на использование мультиспектральных камер или отражение света при подсветке лазерными светодиодами.

Материалы и оборудование

Для проведения исследования на территории Кубанского государственного университета были собраны следующие образцы листьев хвойных и лиственных пород деревьев и кустарников: ель голубая (*Picea pungens*), ель восточная (*Picea orientalis*), туя Стендиша (*Thuja standishii*), сосна горная (*Pinus mugo*), можжевельник казацкий (*Juniperus sabina*), клен остролистный (*Acer platanoides*), самшит колхидский (*Buxus colchica*), акация белая (*Robinia pseudoacacia*), шиповник со-

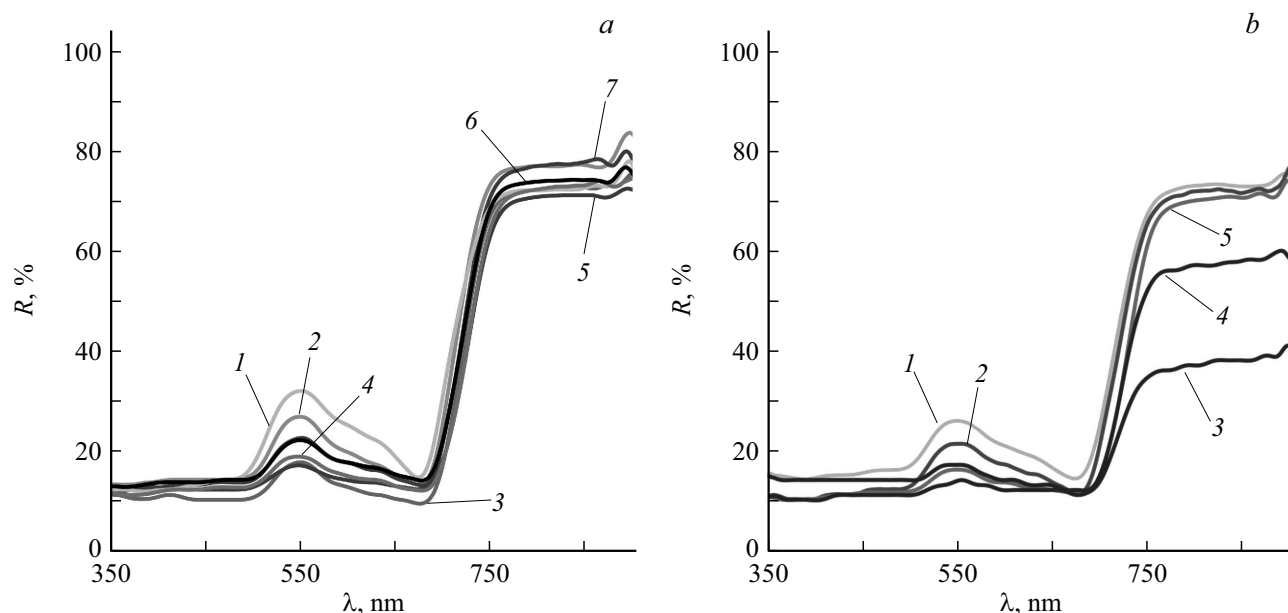


Рис. 1. Оптические спектры диффузного отражения свежих зеленых листьев. (а) Лиственные деревья: 1 — самшит колхидский (*Vixus colchica*), 2 — вишня обыкновенная „Краснодарская сладкая“ (*prunus cerasus* „Krasnodarskaya sladkaya“), 3 — акация белая (*Robinia pseudoacacia*), 4 — шиповник собачий (*Rosa canina*), 5 — платан восточный (*Platanus orientalis*), 6 — ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), 7 — клен остролистный (*Acer platanoides*). (б) Хвойные деревья и кустарники: 1 — ель голубая (*Picea pungens*), 2 — ель восточная (*Picea orientalis*), 3 — туя Стендиша (*Thuja standishii*), 4 — сосна горная (*Pinus mugo*), 5 — можжевельник казацкий (*Juniperus sabina*).

бачий (*Rosa canina*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), платан восточный (*Platanus orientalis*), вишня обыкновенная „Краснодарская сладкая“ (*prunus cerasus* „Krasnodarskaya sladkaya“). Эти представители являются типичными видами деревьев и кустарников на территории Краснодарском края [20]. Образцы листьев выбранных деревьев и кустарников были взяты с нижних частей кроны, по четыре образца одного вида, два из которых с теневой части кроны, а другие два — с освещенной части кроны.

Для сравнения спектральных характеристик зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников с характеристиками зеленых декоративно-искусственных материалов были исследованы спектры диффузного отражения различных зеленых камуфляжных тканей, а также зеленых декоративно-искусственных листьев клена, шиповника, вишни, самшита и ели, визуально неотличимых человеческим глазом от зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников с расстояния более 0.25 m.

Измерения спектров диффузного отражения натуральных и декоративно-искусственных листьев производились в лабораторных условиях с использованием спектрофотометра Hitachi U3900 с двухканальной интегрирующей сферой в спектральном диапазоне от 350 до 900 nm. Для чистоты эксперимента было получено по пять спектров диффузного отражения с каждого исследуемого образца, после чего производилось усреднение массивов данных в рамках одного исследуемого вида.

Результаты измерения и обсуждение

Полученные массивы спектров диффузного отражения зеленых листьев лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края в диапазоне от 350 до 900 nm представлены на рис. 1, а. На рисунке видно, что свежие зеленые листья лиственных деревьев имеют относительно низкую отражательную способность в видимом спектре в пределах от 10 до 30%. Повышение отражательной способности в узком диапазоне длин волн от 520 до 600 nm обусловлено низкой поглощающей способностью хлорофиллов в этом спектральном диапазоне длин волн [21–23]. Отсутствие поглощающих пигментов в области от 700 nm и особенности физиологической структуры листьев [24] объясняют резкое повышение коэффициента диффузного отражения света от поверхности древесного листа на границе видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Значение коэффициента отражательной способности у свежих зеленых листьев деревьев в области длин волн более 750 nm превышает 70% [25,26].

Отражательная способность листьев хвойных деревьев и кустарников представлена на рис. 1, б. Спектры оптического отражения для хвойных деревьев и кустарников схожи со спектрами отражения зеленых листьев лиственных деревьев и кустарников (рис. 1, а) в видимом диапазоне, но имеются выраженные различия в ближнем ИК диапазоне. В ближнем ИК диапазоне коэффициент оптического диффузного отражения для

Таблица 1. Вегетативные индексы „зелености“ рассчитываемые по данным узких спектральных зон (narrowband greenness)

№	Наименование индекса	Формула расчета индекса, где ρ_{xxx} — значение коэффициента отражательной способности на соответствующих длинах волн (xxx — длина волны в nm)	Значение индекса
1	$NDVI_{705}$ (red edge normalized difference vegetation index)	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	Может принимать значения от -1 до 1 , значения от 0.2 до 0.9 определяют уровень „зелености“ растительности
2	mSR_{705} (modified red edge simple ratio index)	$mSR_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{705} - \rho_{445}}$	Может принимать значения от 0 до 30 , значения от 2 до 8 определяют уровень „зелености“ растительности
3	$mNDVI_{705}$ (modified red edge normalized difference vegetation index)	$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{(\rho_{750} + \rho_{705} - (2\rho_{445}))}$	Может принимать значения от -1 до 1 , значения от 0.2 до 0.7 определяют уровень „зелености“ растительности

Таблица 2. Значение индексов „зелености“ листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников, камуфляжных тканей, зеленых декоративно-искусственных листьев

Образцы листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края				
№	Название образца	$NDVI_{705}$	mSR_{705}	$mNDVI_{705}$
1	Ель голубая (<i>Picea pungens</i>)	0.368	3.311	0.536
2	Ель восточная (<i>Picea orientalis</i>)	0.492	3.519	0.557
3	Можжевельник казацкий (<i>Juniperus sabina</i>)	0.483	5.798	0.706
4	Сосна горная (<i>Pinus mugo</i>)	0.476	9.575	0.811
5	Туя Стендиша (<i>Thuja standishii</i>)	0.360	4.596	0.643
6	Акация белая (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	0.431	4.200	0.615
7	Платан восточный (<i>Platanus orientalis</i>)	0.572	7.884	0.775
8	Шиповник собачий (<i>Rosa canina</i>)	0.447	4.584	0.642
9	Самшит колхидский (<i>Buxus colchica</i>)	0.300	2.332	0.400
10	Вишня обыкновенная „Краснодарская сладкая“ (<i>prunus cerasus Krasnodarskaya sladkaya</i>)	0.300	2.332	0.400
11	Ясень обыкновенный (<i>Fraxinus excelsior</i>)	0.370	3.507	0.556
12	Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i>)	0.512	5.635	0.699
Образцы декоративно-искусственных листьев				
13	„Клен“	0.021	1.064	0.031
14	„Шиповник“	0.034	1.130	0.061
15	„Вишня“	0.028	1.132	0.062
Образцы зеленых камуфляжных тканей				
17	Образец 1	0.080	1.296	0.129
18	Образец 2	0.050	1.153	0.071

образцов листьев ели, сосны и можжевельника лежит в области значений от 55 до 70%, что на 10–25% меньше нижней [25,26] границы аналогичной характеристики листьев лиственных деревьев и кустарников. Связано это с тем, что листья лиственных и хвойных пород имеют различную физиологическую структуру [27,28]. Для листьев туи коэффициент диффузного отражения в

ближнем ИК диапазоне на 35% меньше нижней границы аналогичной характеристики для листьев лиственных деревьев и кустарников.

Спектры диффузного отражения различных зеленых камуфляжных тканей и зеленых декоративно-искусственных листьев представлены на рис. 2. На рисунке видно, что в области спектра от 500 до 600 nm у всех

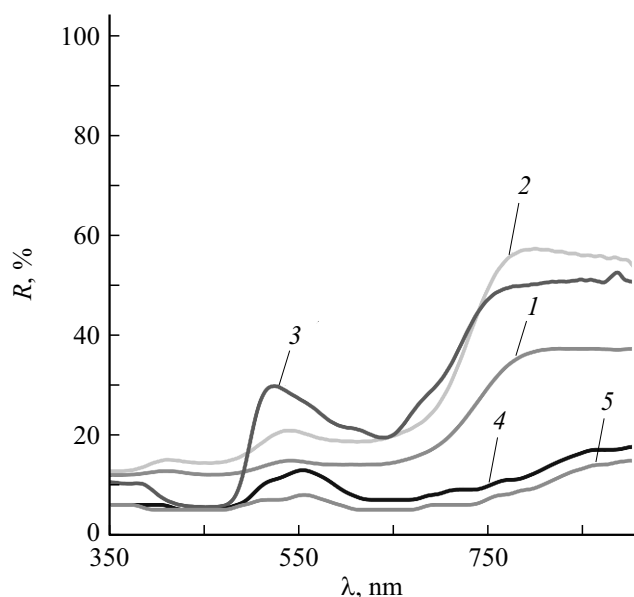


Рис. 2. Оптические спектры зеленых камуфляжных тканей и зеленых декоративно-искусственных листьев: 1 — образец камуфляжа № 1, 2 — образец камуфляжа № 2, 3 — „клен“, 4 — „вишня“, 5 — „шиповник“.

исследуемых образцов наблюдается рост коэффициента отражательной способности. Наиболее высокий рост отражательной способности наблюдается у зеленого декоративно-искусственного листа клена и составляет примерно 25%. Рост коэффициента отражения остальных образцов не превышает 10%. В области длин волн от 650 до 750 nm на спектрах зеленого декоративно-искусственного листа клена и образцах зеленых камуфляжных тканей имеется стремительный рост отражательной способности примерно в 2.5 раза, переходящий в плато. Спектры декоративно-искусственных листьев вишни и шиповника в ближней ИК области имеют плавное увеличение коэффициента отражательной способности до 20%.

На основе проведенного количественного анализа можно сделать вывод, что отражательная способность исследованных образцов свежих зеленых листьев обусловлена содержанием хлорофиллов [21–23] и микроструктурой листьев. Содержание в листьях хлорофиллов разных видов [21–23] определяет наличие пика отражательной способности для фотонов в видимой области спектра [21–23]. В то время как изменение степени рыхлости внешней поверхности листьев определяет вид спектра в инфракрасном диапазоне длин волн [21–23].

Анализируя спектры декоративно-искусственных материалов, можно сделать вывод, что в видимой спектральной области зеленые образцы исследованных камуфляжных тканей имеют вид спектра диффузного отражения, схожий со спектрами зеленых листьев лиственных и хвойных деревьев и кустарников. В ближней ИК области образцы исследованных камуфляжных тканей

имеют вид спектра отражения, схожий со спектрами листьев хвойных пород деревьев.

При проведении сравнительного анализа спектров листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников и спектров различных зеленых камуфляжных тканей и зеленых декоративно-искусственных листьев воспользуемся рекомендованными вегетационными индексами „зелености“ [7,8], которые рассчитываются по значениям коэффициентов отражения в узких спектральных диапазонах длин волн и представлены в табл. 1. Индексы данной группы обусловлены узкой областью инфракрасного склона спектральной кривой отражения от 690 до 750 nm, что позволяет обеспечить высокую эффективность детектирования небольших изменений уровня „зелености“, состояния и содержания различных форм хлорофилла в растительности.

Вычисленные по формулам из табл. 1 значения вегетационных индексов для исследуемых образцов природных листьев, декоративно-искусственных листьев и камуфляжных тканей представлены в табл. 2. Из представленной таблицы видно, что рассчитанные значения вегетационных индексов для искусственных материалов, имитирующих зеленые листья деревьев и кустарников, многократно отличаются от значений аналогичных вегетационных индексов листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников. Исходя из этого можно сделать вывод, что применение предложенных ранее [6–8] индексов „зелености“ позволяет по спектру диффузного отражения дискриминировать искусственные материалы, имитирующие зеленую растительность, на фоне естественных зеленых листьев лиственных и хвойных деревьев и кустарников.

Заключение

В работе впервые исследованы оптические характеристики диффузного отражения света от зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края. Проведено сравнение спектров диффузного отражения света от зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников, произрастающих на территории Краснодарского края, со спектрами диффузного отражения света от зеленых синтетических декоративно-искусственных листьев и камуфляжных материалов.

На основе накопленной информации проведен качественный и количественный анализ спектров, подтвердивший, что исследованные зеленые декоративно-искусственные листья визуально неотличимы человеческим глазом от зеленых хвойных и лиственных листьев деревьев и кустарников Краснодарского края с расстояния более 0.25 m. Зеленые декоративно-искусственные и натуральные листья имеют схожую форму спектральной кривой коэффициента диффузного отражения света, а наибольшее сходство со спектрами отражения декоративно-искусственных листьев наблюдается

для зеленых листьев лиственных пород деревьев и кустарников. Сравнительный анализ зеленых декоративно-искусственных листьев и зеленых листьев хвойных и лиственных деревьев и кустарников показал, что вегетационные индексы „зелености“ различных декоративно-искусственных листьев имеют близкие нулю значения. Такие значения исключены для растительного покрова как в летний период, так и в зимний (для хвойных лесов).

На основе указанных фактов можно предположить, что использование вегетационных индексов позволит разработать алгоритмы и программы, способные при помощи дистанционного анализа диффузного рассеяния света с высокой достоверностью отличать зеленые листья хвойных и лиственных деревьев и кустарников Краснодарского края от зеленых декоративно-искусственных листьев.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Финансирование работы

Статья подготовлена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ „Разработка и адаптация систем управления компенсацией динамических отклоняющих воздействий на мобильные объекты, находящиеся в состоянии динамического равновесия“ № 8.2321.2017/ПЧ.

Список литературы

- [1] *Morris D.B., Kaye P.H.A.* // Endeavour. 1973. V. 32. P. 117–121.
- [2] *Gamon J.A., Qiu H.-L.* // Handbook of Functional Plant Ecology. 1999. P. 805–846.
- [3] *Asner G., Martin R.* // Global Ecology and Conservation. 2016. V. 8. P. 212–219. doi 10.1016/j.gecco.2016.09.010
- [4] *Curran P.J.* // Remote Sensing of Environment. 1989. V. 30. N 3. P. 271–278.
- [5] *Feret J.B., Asner G.P.* // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. N 1. P. 73–84. doi 10.1109/TGRS.2012.2199323
- [6] *Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R.* // Remote Sensing Reviews. 1995. V. 13. N 1. P. 95–120. doi 10.1080/02757259509532298
- [7] *Gilbert M.A., Gonzalez-Piqueras J., Martine B.* // Theory and Application of Vegetation Indices. Optical Observation of Vegetation Properties and Characteristics. 2011. P. 1–43.
- [8] *Xue J., Su B.* // J. Sensors. 2017. doi 10.1155/2017/1353691
- [9] *Maimaitiyiming M., Miller A.J., Sagan V.* // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2016. V. 82. N 2. P. 51–62. doi 10.14358/PERS.82.2.51
- [10] *Zhang C., Huazhong R., Qin Q., Ersoy O.* // Remote Sensing Letters. 2017. V. 8. N 6. P. 576–585. doi 10.1080/2150704X.2017.1306135
- [11] *Gil-Perez B., Zarco-Tejada P., Correa-Guimaraes A., Relea-Gangas E., Gracia L., Hernandez-Navarro S., Sanz Rena J., Berjón A., Martín-Gil J.* // Vitis-Geilweilerhof. 2010. V. 49. N 4. P. 167–173.
- [12] *Penuelas J., Filella I.* // Trends in Plant Science. 1998. V. 3. N 4. P. 151–156. doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01213-8
- [13] *Candiago S., Remondino F., Giglio M., Dubbini M., Gattelli M.* // Remote Sensing. 2015. V. 7. N 4. P. 4026–4047. doi 10.3390/rs70404026
- [14] *Wahab I., Hall O., Jirstrom M.* // Drones. 2018. V. 2. N 3. P. 1–28. doi 10.3390/drones2030028
- [15] *Yang B., Knyazikhin Y., Lin Y., Yan K., Chen C., Park T., Choi S., Mottus V., Rautiainen M., Myneni R., Yan L.* // Remote Sensing. 2016. V. 8. N 7. P. 1–17. doi 10.3390/rs8070563
- [16] *Lukes P., Stenberg P., Rautiainen M., Mottus M., Vanhatalo K.* // Remote Sensing Letters. 2013. V. 4. N 7. P. 667–676. doi.org/10.1080/2150704X.2013.782112
- [17] *Mottus M., Hernandez-Clemente R., Perheentupa V., Markiet V.* // Plant Methods. 2017. doi.org/10.1186/s13007-017-0184-4
- [18] *Sun Z., Wu D., Lu Y., Lu S.* // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. N 7. P. 4388–4406. doi 10.1109/TGRS.2019.2890998
- [19] *Huang Cho-Ying, Wei Hsin-Lin., Rau Jiann-Yeou., Jhan Jyun-Ping* // GIScience & Remote Sensing. 2018. V. 56. N 4. P. 605–623. doi 10.1080/15481603.2018.1550873
- [20] *Hycza T., Sterenczak K., Balazy R.* // New Zealand Journal of Forestry Science. 2018. doi.org/10.1186/s40490-018-0123-9.
- [21] *Yacobi Y.* // Israel Journal of Plant Sciences. 2012. V. 60. P. 243–251. doi 0.1560/IJPS.60.1-2.243
- [22] *Petrovic S.M., Zvezdanovic J.B., Anelkovic T.D., Markovic D.Z.* // Savremene Tehnologije. 2012. V. 1. N 1. P. 16–24.
- [23] *Liew O.W., Chong P., Bingqing L., Asundi A.* // Sensors. 2008. V. 8. N 10. P. 3205–3239. doi 10.3390/s8053205
- [24] *Karabulut M.* // J. Int. Environmental Application & Science. 2018. V. 13. N 4. P. 194–203.
- [25] *Белов М.И., Фесенко Ю.С., Городничев В.А., Кувшинов А.В.* // Радиооптика. 2014. Т. 1. № 1. С. 1–17. doi.org/10.7463/rdopt.0316.0840843
- [26] *Velichkova K., Krezhova D.* // RAD Conference Proceedings. 2017. V. 2. P. 276–282.
- [27] *Rautiainen M., Lukes P., Homolova L., Hovi A., Pisek J., Mottus V.* // Remote Sensing. 2018. V. 10. N 2. P. 1–28. doi.org/10.3390/rs10020207
- [28] *Hovi A., Raitio P., Rautiainen I. M.* // Silva Fennica. 2017. V. 51. N 4. P. 7753-1-16. doi.org/10.14214/sf.7753