

Спектральные линзы как дисперсионные элементы для регистрации спектральных индексов

В. А. Бланк^{1,2}, Р. В. Скиданов^{1,2}, Л. Л. Досколович¹

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Предложен новый тип дифракционных линз — спектральные линзы для работы в ± 1 порядках дифракции. Спектральные линзы этого типа формируют в +1 и –1 порядках четкое изображение заданных длин волн. Такие линзы удобны для формирования индексных изображений вместо полноценного гиперспектрального изображения. Были рассчитаны и изготовлены спектральные дифракционные линзы для вегетационных индексов: модифицированный относительный водный индекс для области ближнего инфракрасного склона (Modified Red Edge Simple Ratio Index) и водный индекс (Water Band Index). Изготовление дифракционных линз происходило методом прямой лазерной записи по фоторезисту. Высота сформированного микрорельефа составляла 4 мкм. На основе изготовленных спектральных линз был собран лабораторный макет изображающего индексного сенсора. Путем линейного сканирования растительных объектов были экспериментально получены изображения вышеуказанных вегетационных индексов.

Ключевые слова: дифракционные линзы, спектральные линзы, вегетационные индексы, гиперспектрометр.

Цитирование: Бланк, В. А. Спектральные линзы как дисперсионные элементы для регистрации спектральных индексов / В. А. Бланк, Р. В. Скиданов, Л. Л. Досколович // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 229–234.

Введение

Информация о наземной растительности, полученная с помощью дистанционного зондирования, может быть полезной для приложений в области мониторинга окружающей среды, сельского хозяйства, лесного хозяйства, городской зеленой инфраструктуры и других областях. В частности, эти типы информации применяются к сельскому хозяйству, для оценки состояния полей и урожайности сельскохозяйственных культур [1, 2].

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Для таких задач можно использовать спектральные дифракционные линзы, так как они позволяют сфокусировать излучение нескольких различных длин волн в различных точках, так что каждая длина волны фокусируется в «своём» фокусе.

Вегетационные индексы — это представленные в виде алгебраических выражений комбинации коэффициентов отражения изучаемого объекта в нескольких узких спектральных диапазонах, которые отражают значения целевых характеристик исследуемого объекта (например, количества воды в растительном покрове). Спектральные дифракционные линзы,

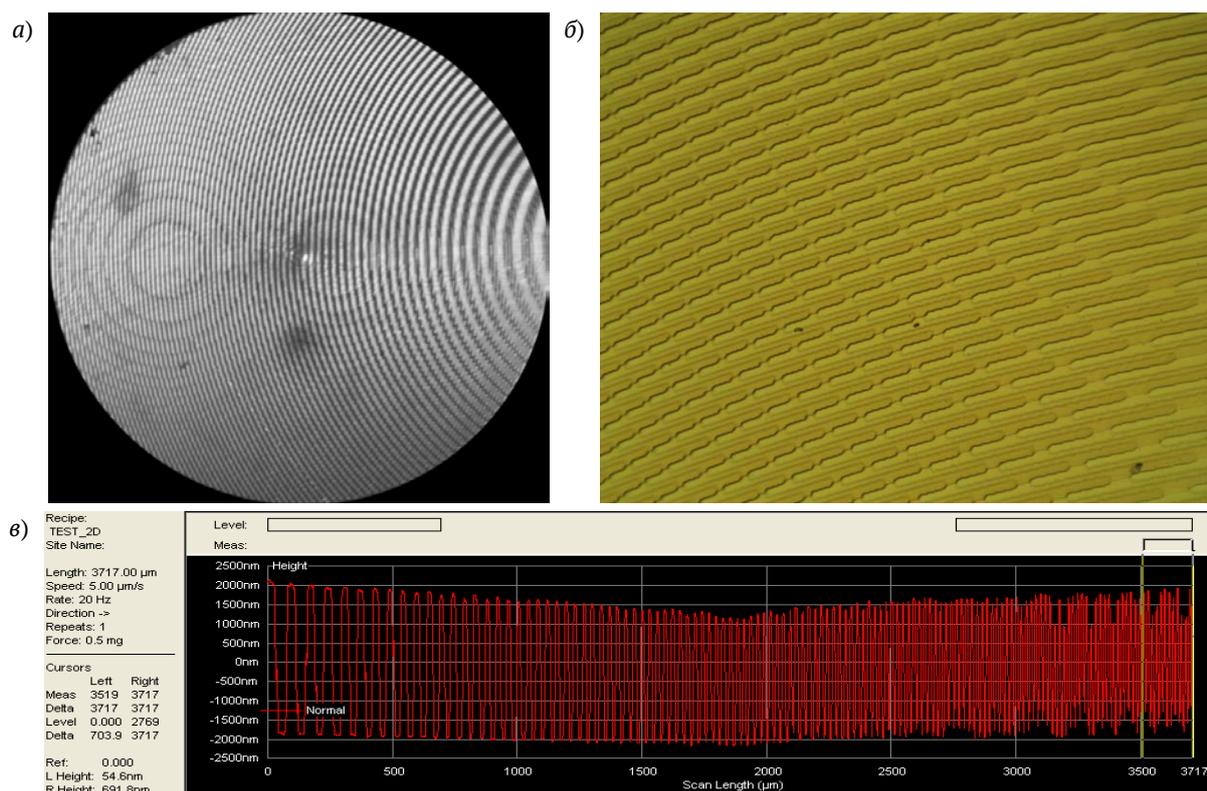


Рис. 1. Внешний вид СДЛ (455 нм, 750 нм) под оптическим микроскопом (а), внешний вид участка СДЛ (455 нм, 750 нм) с тонкой структурой под оптическим микроскопом (б), профилограмма СДЛ (455 нм, 750 нм), полученная вдоль линии симметрии (в)

фокусирующие в различных точках излучение заданных длин волн, соответствующих одному или нескольким спектральным индексам, могут быть использованы при создании простых и компактных сенсоров для мониторинга растительного покрова [3, 4]. Такие сенсоры, например, могут быть использованы на БПЛА для решения задач умного сельского хозяйства.

1. Изготовление спектральных дифракционных линз

Из [5] были выбраны вегетационные индексы для расчета и изготовления спектральных дифракционных линз. В качестве основы были выбраны вегетационные индексы: модифицированный относительный водный индекс для области ближнего инфракрасного склона (445 нм и 750 нм) и водный индекс (900 нм и 970 нм). Спектральные дифракционные линзы (СДЛ) были изготовлены методом прямой лазерной записи на станции лазерной записи CLWS-2014 по фоторезисту ФП-3535 с толщиной 6 мкм, который был предварительно нанесен на кварцевую подложку методом центрифугирования. При этом высота формируемого микрорельефа составила около 4 мкм.

Для экспериментальных исследований были изготовлены две спектральные линзы: диаметром 4 мм и фокусным расстоянием $f = 70$ мм для разделения длин волн 455 нм, 750 нм, и диаметром 4 мм и фокусным расстоянием $f = 35$ мм для разделения длин волн 900 нм, 970 нм. На рис. 1а и 2а показаны изображения микрорельефов спектральных линз для длин волн 455 нм, 750 нм, 900 нм и 970 нм соответственно, полученные в оптическом микроскопе.

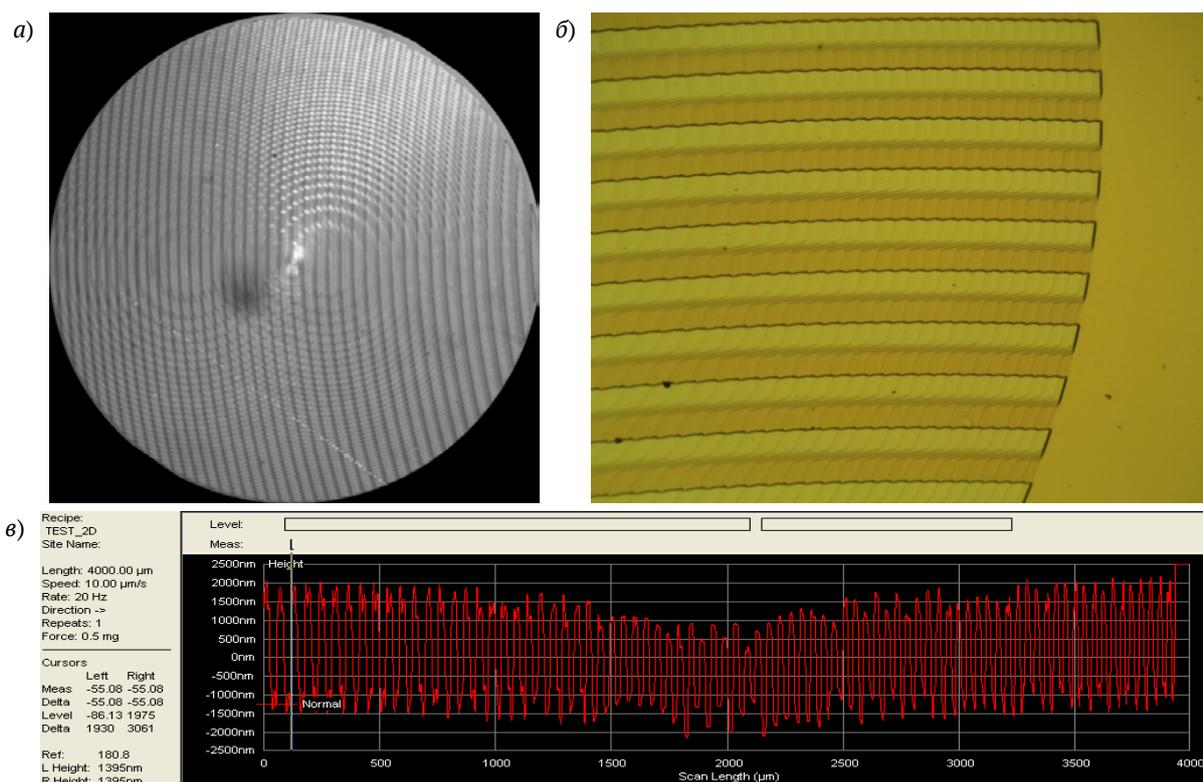
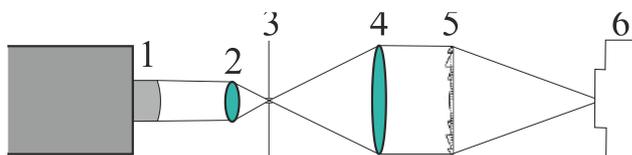


Рис. 2. Внешний вид СДЛ (900 нм, 970 нм) под оптическим микроскопом (а), внешний вид участка СДЛ (900 нм, 970 нм) с тонкой структурой под оптическим микроскопом (б), профилограмма СДЛ (900 нм, 970 нм), полученная вдоль линии симметрии (в)



1 – перестраиваемый лазер NT-242, 2 – микрообъектив, 3 – точечная диафрагма диаметром 10 мкм, 4 – коллимирующая линза, 5 – ДОЭ, 6 – регистрирующая камера Basler acA 1920-40um

Рис. 3. Оптическая схема для измерения функций рассеяния точки ДОЭ

На рис. 1б и 2б представлено изображение участка микрорельефа, где хорошо видна тонкая структура спектральной линзы. На рис. 1в 2в представлена профилограмма, полученная по линии симметрии линзы.

2. Эксперименты с перестраиваемым лазером.

Перестраиваемый лазер использовался для точного определения функции рассеяния точки спектральных дифракционных линз на заданных длинах волн. Для этого была собрана экспериментальная установка, оптическая схема которой представлена на рис. 3.

Перестраиваемый лазер NT-242 формировал пучок с заданной длиной волны. Линза 2 фокусировала пучок на точечной диафрагме диаметром 10 мкм. После этого линза 4 формирует коллимированный пучок с углом расходимости менее $0,0001^\circ$. Коллимированный пучок падает на СДЛ, которая фокусирует свет на светочувствительной матрице камеры Basler

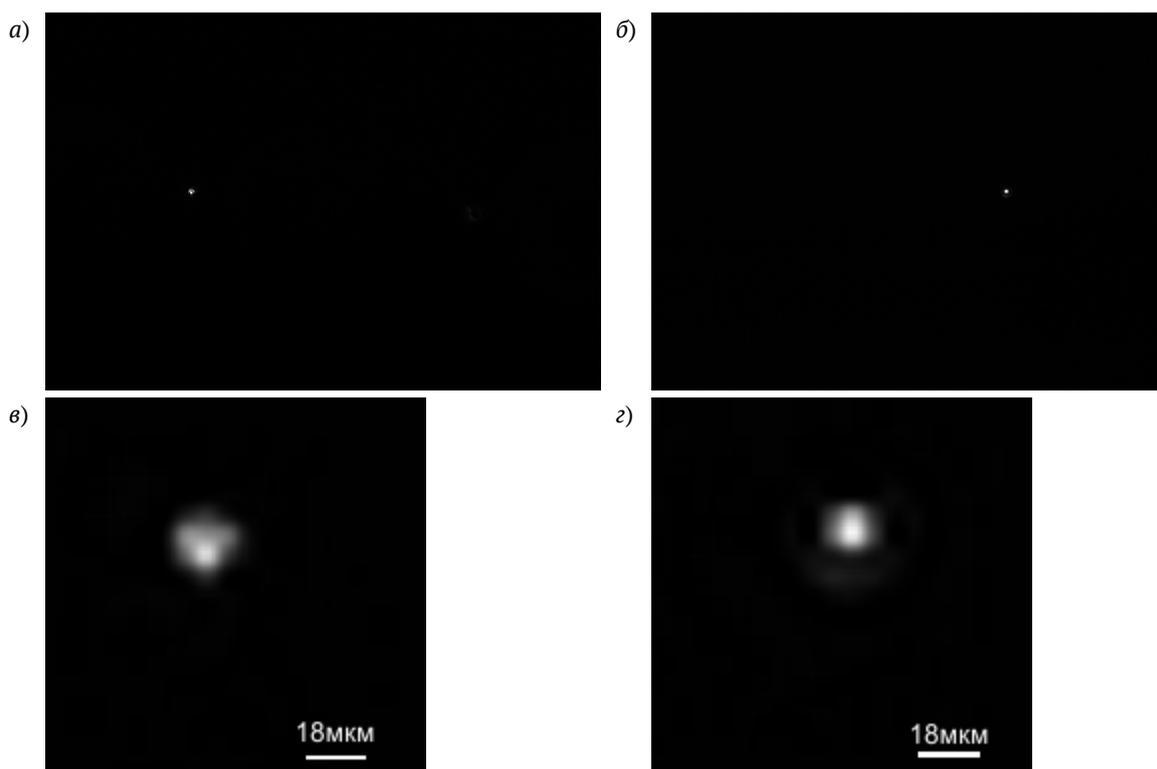


Рис. 4. Порядки на матрице для линзы на 455–750 нм: на длине волны 455 нм (а), на длине волны 750 нм (б), и их увеличенные изображения (в и г, соответственно)

асА 1920-40μm. На рис. 4а представлено распределение интенсивности на длине волны 0,455 мкм, на рис. 4б — для длины волны 750 нм.

На рис. 5а представлено распределение интенсивности на длине волны 0,9 мкм, на рис. 5б — для длины волны 0,97мкм.

Как видно из рис. 4 и рис. 5 ширина ФРТ по полувысоте менее 10 мкм, что говорит о высоком качестве формируемого изображения, и тем самым о потенциальной возможности создания на базе представленных спектральных дифракционных линз сенсоров для определения заданных гиперспектральных индексов с высоким пространственным разрешением.

3. Эксперимент со спектральной дифракционной линзой на 900 нм и 970 нм.

Цель следующей серии экспериментов подтверждение работы СДЛ в качестве элемента сенсора для определения спектрального индекса. Для получения индексного изображения в эксперименте использовался щавель кислый (*Rumex acetosa*) и СДЛ на 900 нм и 970 нм. Расстояние между объектом и линзой составляло около 1 м. Кроме этого для работы изображающего гиперспектрометра необходимо осуществлять сканирование объекта, для этого использовалась платформа с шаговым двигателем, который перемещал объект для осуществления сканирования и получения изображений.

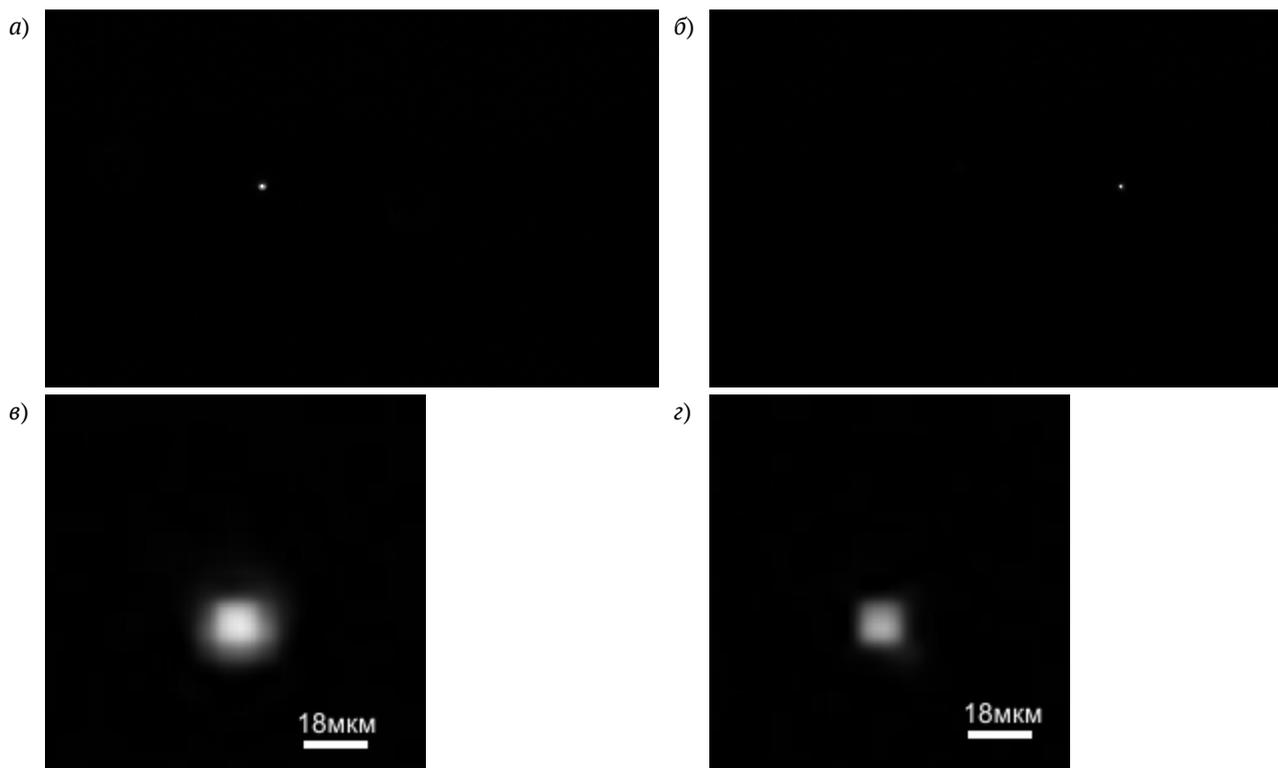


Рис. 5. Порядки на матрице для линзы на 900–970 нм: на длине волны 900 нм (*a*), на длине волны 970 нм (*б*), и их увеличенные изображения (*в* и *г*, соответственно)

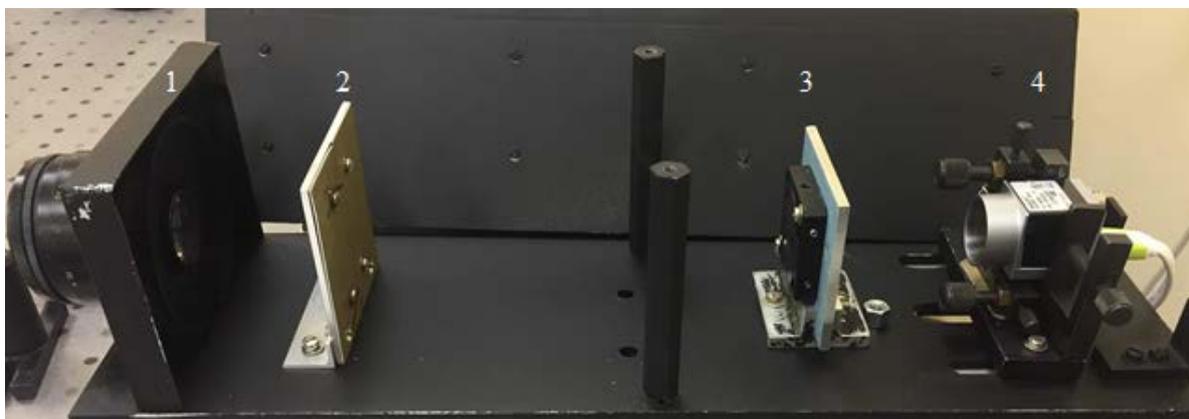


Рис. 6. Экспериментальная установка

На рис. 6 представлена экспериментальная установка, где *1* — объектив, *2* — щелевая диафрагма, *3* — спектральная дифракционная линза, *4* — камера Basler acA 1920-40um.

После получения набора спектральных изображений при помощи программы была произведена сборка изображений на длинах волн 900 нм (рис. 7*a*) и 970 нм (рис. 7*б*). По результатам сборки изображений было получено индексное изображение (рис. 7*в*).

На изображении 7*в* светлый фон — это листья растения, а темный фон показывает завядшую часть листьев или их отсутствие.

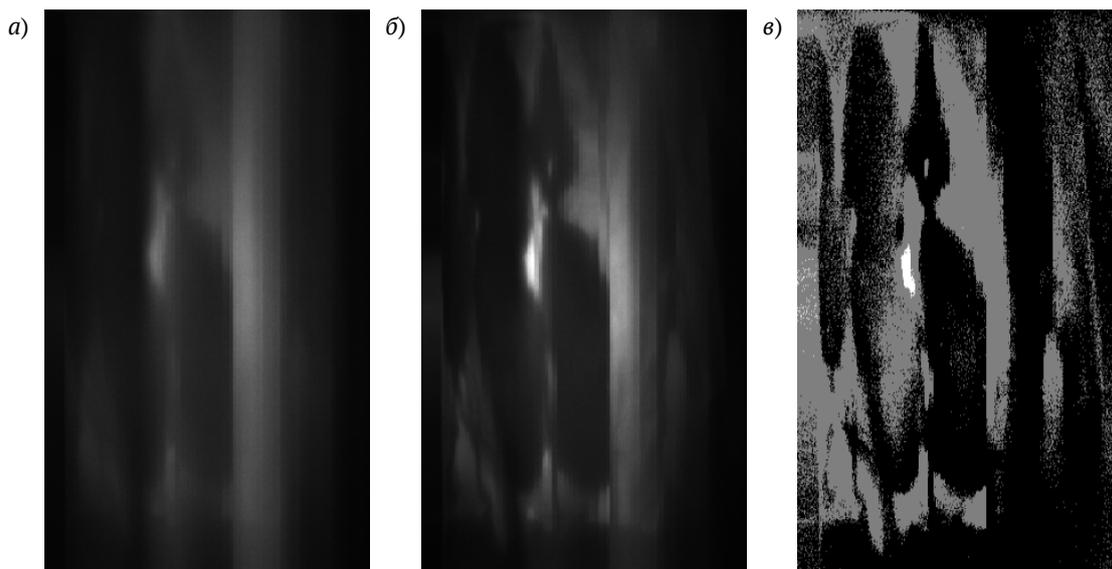


Рис. 7. Собранные изображения: на длине волны 900 нм (а), на длине волны 970 нм (б) и индексное изображение (в)

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что дифракционные оптические элементы подходят для фокусировки различных длин волн в различные точки. А это позволяет использовать такие линзы для исследования вегетационных индексов зеленой растительности.

Экспериментальное исследование этих элементов позволило оценить для них ФРТ, ширина которого в большинстве случаев менее 10 мкм, что для данного соотношения апертуры и фокусного расстояния близко к дифракционному пределу.

В результате эксперимента был получен вегетационный индекс, что доказывает возможность использования таких линз в составе сенсоров.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №20-69-47110

Список источников

- [1] **Mulla, D. J.** [Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps](#) / D. J. Mulla // Biosystems Engineering. — 2013. — Vol. 114. — № 4. — P. 358–371.
- [2] **Xue, J.** [Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications](#) / J. Xue, B. Su // Journal of Sensors. — 2017. — Vol. 2017. — P. 1353691. — 17 p.
- [3] **Doskolovich, L. L.** [Design of diffractive lenses operating at several wavelengths](#) / L. L. Doskolovich, R. V. Skidanov, E. A. Bezus, S. V. Ganchevskaya, D. A. Bykov, N. L. Kazanskiy // Optics Express. — 2020. — Vol. 28. — № 8. — P. 11705–11720.
- [4] **Скиданов, Р. В.** Спектральные дифракционные линзы для формирования источника света с излучением нескольких заданных длин волн / Р. В. Скиданов, Л. Л. Досколович, В. С. Васильев, С. В. Ганчевская, В. А. Бланк, В. В. Подлипнов, Н. Л. Казанский // Автометрия. — 2020. — Vol. 2. — P. 69–76.
- [5] **Черепанов, А. С.** [Вегетационные индексы](#) / А. С. Черепанов // Геоматика. — 2011. — № 2. — С. 98–102.