

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Моделирование распространения оптических импульсов
при помощи пакета PyNLO**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4022 группы
Направления 03.03.02 «Физика» Института физики
Гонтарева Данилы Вячеславовича

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

А. И. Конюхов

Заведующий кафедрой
общей, теоретической
и компьютерной физики
профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

Саратов
2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном мире все больше применений находят оптические технологии. Они используются в сфере коммуникационных сетей и систем связи, также они применяются в медицинских диагностических приборах. Оптические приборы используют оптические волокна. Нелинейные эффекты, такие как самомодуляция и образование оптических солитонов, возникающие в оптических волокнах, позволяют значительно увеличить пропускную способность и дальность передачи сигналов.

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР) – определение особенностей распада многосолитонных импульсов при распространении в оптических волокнах.

Задачи ВКР:

1. Ознакомление с методами моделирования распространения оптических импульсов в оптических волокнах.
2. Ознакомление и составление описания к библиотеке PyNLO языка программирования Python.
3. Проведение серии расчетов для различных параметров импульса и волокна.
4. Расчет спектральной функции когерентности при наличии шума.

Научная новизна – результаты моделирование взаимодействия световых импульсов и оптических волокон с разными параметрами.

Структура ВКР

Выпускная квалификационная работа содержит следующие разделы:

Введение,

1. Библиотека PyNLO.

2. Результаты расчетов.

Заключение.

Список использованных источников, состоящий из 10 наименований.

Приложения (А, Б, В, Г), содержащие программные коды.

Общий объем работы составляет 36 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана актуальность выбранной темы работы и теория, используемая в данной работе.

В первом разделе описывается библиотека PyNLO используемая в работе для моделирования распространения оптических импульсов в оптическом волокне, ее классы и методы и их параметры.

PyNLO является библиотекой для языка программирования Python. В PyNLO применяются методы об объектно-ориентированного программирования для моделирования световых импульсов, сред распространения света и взаимодействия между ними.

PyNLO это бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом. PyNLO распространяется по лицензии GPLv3, что предоставляет любым желающим право копировать, модифицировать и распространять данное программное обеспечение.

В PyNLO реализованы возможности моделирования распространения оптических импульсов и лучей в материалах с нелинейными свойствами: оптических волокнах и кристаллах. Поддерживается моделирование эффектов трехволнового и четырехволнового смешения, керровской нелинейности и вынужденного комбинаторного рассеивания

Моделирование распространения оптического импульса осуществляется путем решения нелинейного уравнения Шредингера. Для этого используется метод преобразования Фурье или метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Для осуществления преобразования Фурье поддерживается использование пакета `pyFFTW` – оболочки для быстрой библиотеки `FFTW` языка C и методов пакета `SciPy`.

Во втором разделе приведены результаты компьютерного моделирования распространения оптических импульсов с различными параметрами в оптических волокнах.

Односолитонный импульс (рисунок 1). Параметры односолитонного импульса:

длительность импульса – 2 пс,

центральная длина волны 1550 нм,

энергия импульса – $2.5 \cdot 10^{-12}$ Дж,

групповая дисперсия – 0 пс²,

дисперсия третьего порядка – 0 пс³,

длительность моделирования – 200 пс,

количество шагов вычислений – 1000,

количество точек – 213,

β_2 – -12.6 пс²/км, β_3 – 0 пс³/км, β_4 – $1 \cdot 10^{-4}$ пс⁴/км,

длина волокна – 106 мм,

α – 0 Дб/см, γ – 9 1/(В км),

эффекты вынужденного комбинаторного рассеивания и самоукручения отсутствуют.

Из графика (в) рисунка 1 видно, что спектр импульса при прохождении через оптическое волокно под действием нелинейных эффектов не изменился.

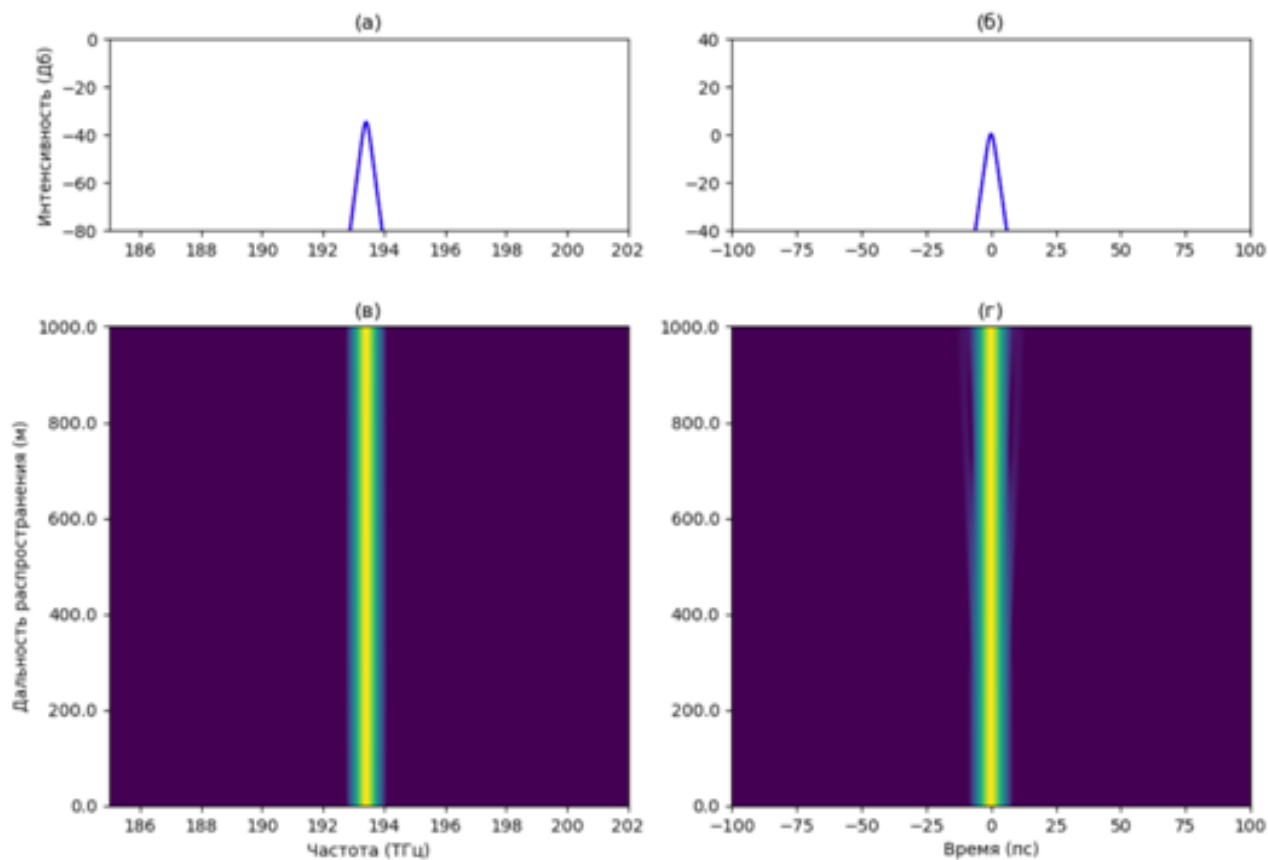


Рисунок 1 – графики зависимости интенсивности от частоты, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе(а), интенсивности от времени, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (б), частотного спектра от координаты вдоль волокна (в) и интенсивности от времени для каждой координаты вдоль волокна (г) для односолитонного импульса.

Многосолитонный импульс (рисунок 2) . Моделирование проведено с теми же, как и в случае односолитонного импульса, за исключением продолжительности импульса, и энергии импульса:

- продолжительность импульса – 3 пс,
- энергия импульса – $32 \cdot 10^{-12}$ Дж.

На графике (в) рисунка 2 видно несколько различных повторяющихся пиков, что свидетельствует о существовании нескольких солитонов.

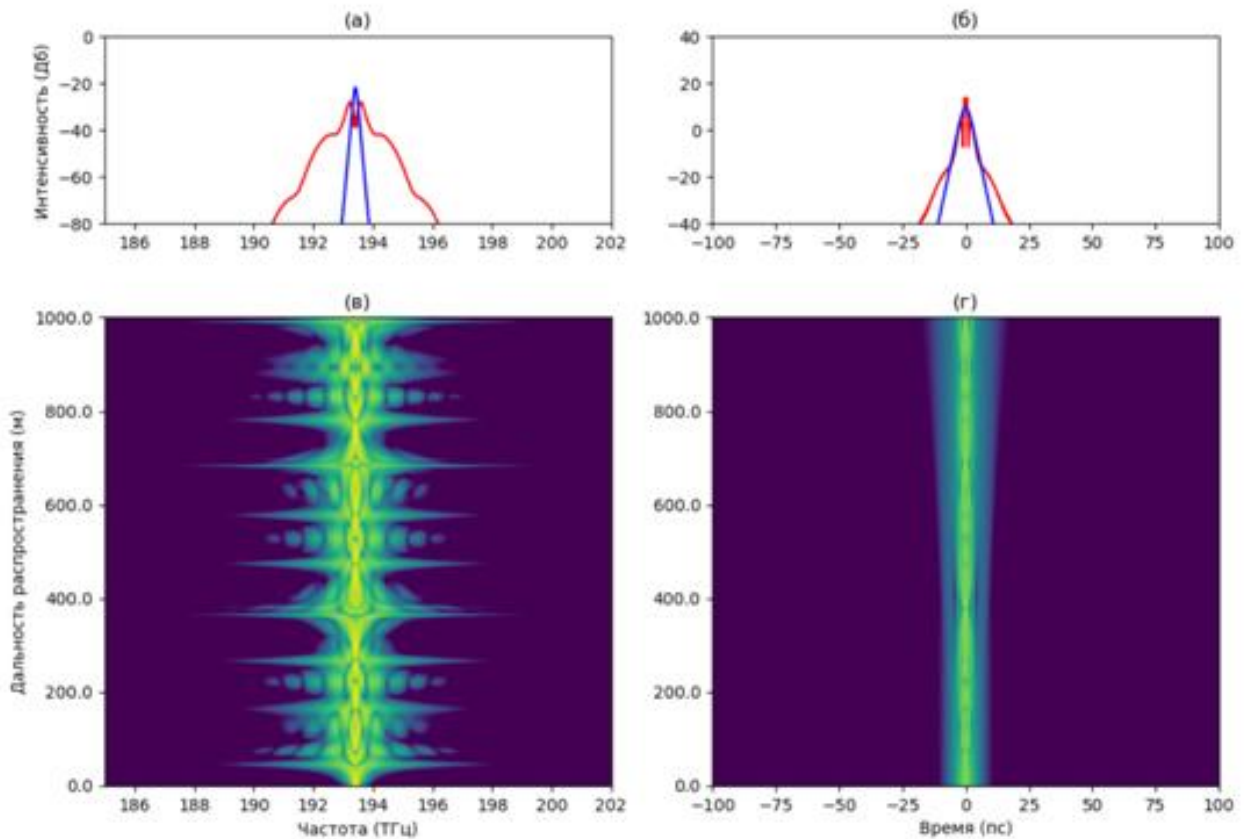


Рисунок 2 – графики зависимости интенсивности от частоты, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (а), интенсивности от времени, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (б), частотного спектра от координаты вдоль волокна (в) и интенсивности от времени для каждой координаты вдоль волокна (г) для многосолиitonного импульса

Моделирование генерации суперконтинуума (рисунок 3). Суперконтинуум получают при помощи сверхкоротких лазерных импульсов, обычно их длительность находится в диапазоне от десятков фемтосекунд до пикосекунд. Для генерации суперконтинуума использовались следующие параметры:

- длительность импульса – 0.05 пс,
- центральная длина волны 1550 нм,
- энергия импульса – $50 \cdot 10^{-12}$ Дж,
- групповая дисперсия – 0 пс^2 ,
- дисперсия третьего порядка – 0 пс^3 ,
- длительность моделирования – 10 пс,
- количество шагов вычислений – 1000,
- количество точек – 2^{13} ,
- $\beta_2 - -120 \text{ пс}^2/\text{км}$, $\beta_3 - 0 \text{ пс}^3/\text{км}$, $\beta_4 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ пс}^4/\text{км}$,
- длина волокна – 20 мм,
- $\alpha - 0 \text{ Дб/см}$, $\gamma - 1000 \text{ 1/(В км)}$,

эффекты вынужденного комбинаторного рассеивания и самоукручения присутствуют.

На рисунке 3 представлены результаты работы программы в виде графиков зависимости интенсивности от частоты, синий для импульса на входе, красный для

импульса на выходе (а), интенсивности от времени, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (б), частотного спектра от координаты вдоль волокна (в) и интенсивности от времени для каждой координаты вдоль волокна (г) для многосолитонного импульса.

На графике (в) видно, что при прохождении через оптическое волокно, спектр импульса расширяется до определенного диапазона, после чего на оставшемся участке оптического волокна остается неизменным. Текст программы изложен в приложении В, используются те же классы и методы что и для односолитонного и многосолитонного импульса, но с другими начальными параметрами импульса, волокна и взаимодействия.

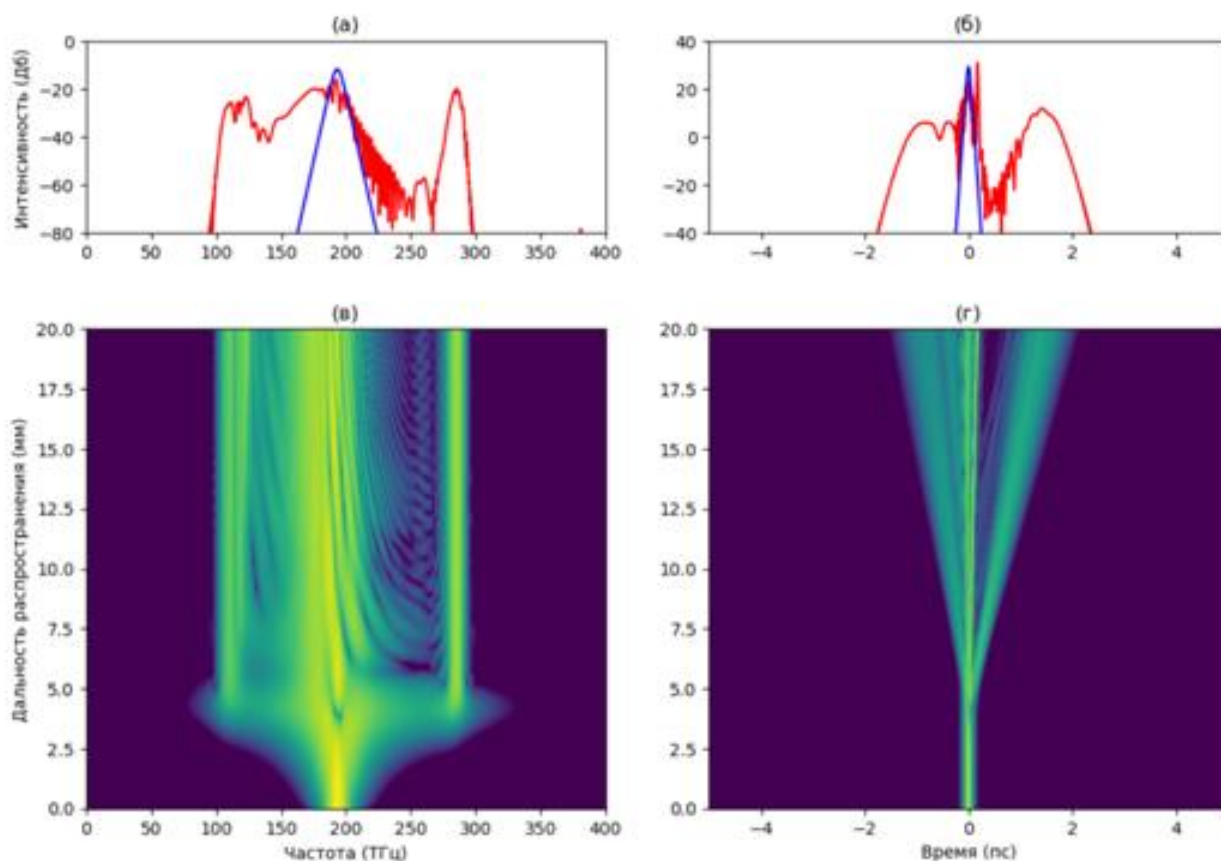


Рисунок 3 – графики зависимости интенсивности от частоты, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (а), интенсивности от времени, синий для импульса на входе, красный для импульса на выходе (б), частотного спектра от координаты вдоль волокна (в) и интенсивности от времени для каждой координаты вдоль волокна (г) для суперконтинуума

Расчет функции когерентности. Была рассчитана функция когерентности g_{12} для импульса с такими же параметрами как при генерации суперконтинуума с добавлением случайного шума. Из-за шума спектр уширяется, его границы размываются, что приводит к снижению качества спектра и может вызывать снижение когерентности.

Для расчета функции когерентности использовались те же параметры, что и для генерации суперконтинуума. Программа 5 раз провела моделирование, каждый

раз добавляя случайный шум по одному фотону для каждой частоты в независимости от изначального значения, после чего рассчитала функцию когерентности. Визуализация результатов представлена на рисунке 4, слева отображена зависимость значения функции когерентности от расстояния и частоты, слева отображена зависимость частотного спектра от расстояния. Из-за шума спектр уширяется, его границы размываются, что приводит к снижению качества спектра и может вызывать снижение когерентности. Текст программы изложен в приложении Г, для моделирования импульса, волокна и взаимодействия используются те же классы и параметры, что и при генерации суперконтинуума, но применяется другой метод `calculate_coherence()` класса `pyNLO.interactions.FourWaveMixing.SSFM.SSFM`.

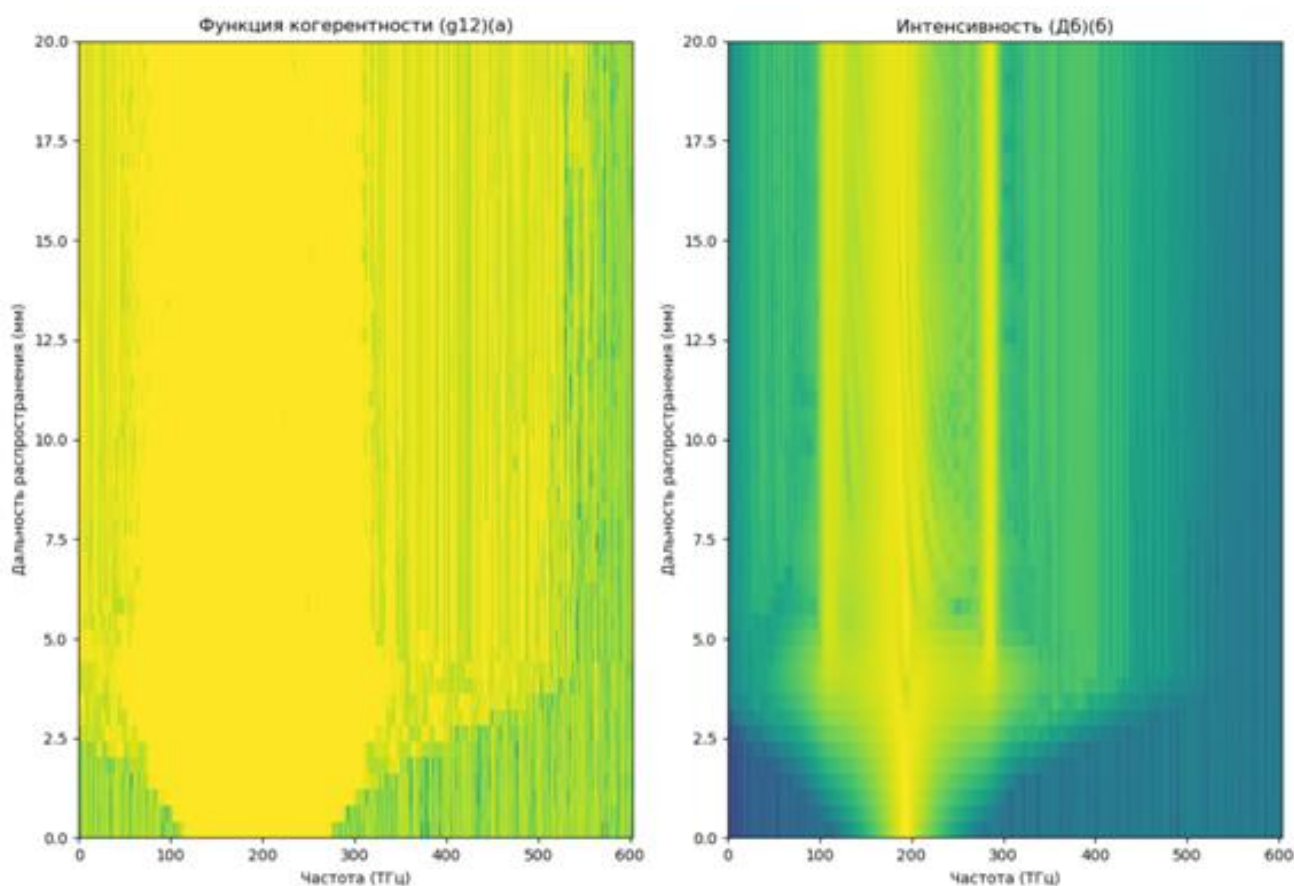


Рисунок 4 – графики зависимости параметров g_{12} от частоты для каждой координаты вдоль волокна (а) и частотного спектра от координаты вдоль волокна (б) для суперконтинуума

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было произведено ознакомление с методами математического моделирования нелинейного распространения оптических импульсов в оптических волокнах, а также с библиотекой PyNLO для языка программирования Python, ее возможностями в области модели-

рования нелинейного распространения оптических импульсов и принципом ее работы. Была частично переведена документация для библиотеки PyNLO.

В работе было проведено моделирование взаимодействия световых импульсов и оптических волокон с разными параметрами. Подобранны параметры для генерации односолитонных и многосолитонных импульсов и суперконтинуума. Произведено вычисление функции когерентности для импульсов с заданными параметрами. Рассмотрено влияние шума на когерентные свойства выходного спектра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Звелто, О. Принципы лазеров // О. Звелто ; пер. Е. В. Сорокина, И. Т. Сорокиной, К. Ф. Шипилова ; под ред. Т. А. Шмаонова. – 3-е изд. перераб. и доп.– М. : Мир, 1990. – 518 с.
- [2] Арагвал, А. Нелинейная волоконная оптика // А. Арагвал ; пер. С. В. Черникова, И. Ю. Хрущева, Д. В. Коробкина ; под ред. П. В. Мамышева. – М. : Мир, 1996. – 215 с.
- [3] Желтиков, А. М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // А. М. Желтиков. – М.: Успехи физических наук, 2006. – 623 с.
- [4] Hult, J. A Fourth-Order Runge–Kutta in the Interaction Picture Method for Simulating Supercontinuum Generation in Optical Fibers // J. Hult – Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no. 12, 2007. – С. 3770-3775
- [5] PyNLO [Электронный ресурс] // GitHub [Электронный ресурс]: - URL: <https://github.com/pyNLO/PyNLO/tree/master/> (дата обращения: 30.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- [6] GNU General Public License [Электронный ресурс] // GNU Operating Systems [Электронный ресурс]: - URL: <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html> (дата обращения: 30.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- [7] pynlo.light [Электронный ресурс] // PyNLO package [Электронный ресурс]: - URL: <https://pynlo.readthedocs.io/en/latest/pynlo.html#pynlo-light> (дата обращения: 30.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- [8] pynlo.media [Электронный ресурс] // PyNLO package [Электронный ресурс]: - URL: <https://pynlo.readthedocs.io/en/latest/pynlo.html#pynlo-media> (дата обращения: 30.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- [9] pynlo.interactions [Электронный ресурс] // PyNLO package [Электронный ресурс]: - URL: <https://pynlo.readthedocs.io/en/latest/pynlo.html#pynlo-interactions> (дата обращения: 30.05.2024). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- [10] Dudley, J. M., Coen S. Numerical simulations and coherence properties of supercontinuum generation in photonic crystal and tapered optical fibers // J. M. Dudley, S. Coen – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 8, no. 3, 2002. – С. 651-659