

НГУ, ИВТ СО РАН

**Чеховской Игорь Сергеевич**, igor428m@gmail.com, i.s.chekhovskoy@gmail.com

Очная форма обучения

Аспирант НГУ, 4-й курс

**Специальность:** 05.13.18

**Работа проводилась в рамках написания диссертации**

**Научный руководитель:** Федорук М.П.

**Год окончания обучения:** 2018

**Состав коллектива:**

- Федорук Михаил Петрович, НГУ, ректор, д.ф.-м.н., чл.-корр., mifester@gmail.com, руководитель.
- Рубенчик Александр Маркович, Ливерморская национальная лаборатория, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор, консультант.
- Турицын Сергей Константинович, Астонской Институт Технологий Фотоники, директор, к.ф.-м.н., профессор, консультант.
- Штырина Ольга Владимировна, ИВТ СО РАН, научный сотрудник, к.ф.-м.н., olya.shtyrina@gmail.com, консультант.

**Тема работы:** Численное моделирование нелинейных волновых эффектов в связанных волноводах

**Аннотация:** Работа посвящена исследованию нелинейных волновых эффектов, возникающих в многосердцевинных световодах при распространении по ним оптических импульсов. Впервые с помощью математического моделирования продемонстрирована возможность использования многосердцевинных световодов в качестве основы устройства для сокращения временной длительности оптических импульсов, а также для нелинейного сложения импульсов, вводимых в каждую сердцевину. Предложенная технология открывает новые перспективы для генерации сверхкоротких лазерных импульсов большой мощности. Кроме этого, в работе предложены два эффективных численных метода моделирования нелинейной динамики оптических импульсов в многосердцевинных световодах произвольной структуры.

**Современное состояние проблемы:**

Задача увеличения производительности сверхбыстрых волоконных лазеров в последние

годы привлекает большое внимание в виду необходимости создания лазерных источников с высокой энергией, большой пиковой мощностью и высокой частотой повторения. Однако, прогресс в данной области был ограничен, главным образом, нелинейными эффектами, вызванными прохождением мощных импульсов в сердцевине с малым радиусом, которые часто приводили к искажению импульсов и повреждению рабочего волокна. Одним из подходов для уменьшения влияния нелинейности является изготовление волокон с большой эффективной площадью.

Идея использовать волновой коллапс для сжатия и сложения оптических импульсов была впервые предложена более 20 лет назад, но ее практическая реализация, использующая массив волноводов, до сих пор была слишком сложной. В работах [“Energy localization in nonlinear fiber arrays: Collapse-effect compressor” / A. В. Aceves et al. // PRL.—1995.—Vol. 75.—P. 73–76; “Optical pulse compression using fiber arrays” / A. В. Aceves et al. // OFT.—1995.—Vol. 1, No. 3.—P. 244–246.] с помощью численного моделирования было продемонстрировано, что импульсы, одновременно запущенные во все волноводы, могут быть сложены в небольшом числе близко расположенных волноводов с одновременным уменьшением их длительности.

Многосердцевинные световоды (MCF) являются одним из видов массивов волноводов с особым расположением небольшого числа сердцевин, на основе которого предложенная идея может быть реализована. При этом такой тип нелинейного сложения импульсов существенно отличается от популярной в настоящее время схемы линейного сложения и может быть полезен для других задач по переносу энергии с помощью оптических волокон. Увеличенная эффективная площадь сечения многосердцевинных световодов позволяет складывать высокоэнергетические импульсы при сохранении компактных размеров всей схемы.

## Описание работы

В настоящее время в мире наблюдается ежегодный рост объёмов телекоммуникационных услуг, что обусловлено перманентным расширением доступности Интернета и цифрового телевидения. Одним из способов увеличения пропускной способности современных линий связи является использование многосердцевинных оптических световодов вместо традиционных односердцевинных. Данные световоды представляют собой расположенные под одной общей оболочкой индивидуальные волноводы, по каждому из которых одновременно может распространяться одна или несколько мод света. Уже существующие лабора-

торные образцы многосердцевинных оптических волокон обладают существенно большей пропускной способностью по сравнению с односердцевинными световодами.

В многосердцевинных световодах, используемых для передачи данных, отдельные сердцевинки обычно расположены на большом расстоянии для уменьшения их взаимодействия. Однако к настоящему времени для многосердцевинных световодов с близко расположенными сердцевинками также предложены перспективные приложения в задачах лазерной физики.

Работа посвящена исследованию нелинейных волновых эффектов, возникающих в многосердцевинных световодах при распространении по ним оптических импульсов. Впервые с помощью математического моделирования продемонстрирована возможность использования многосердцевинных световодов в качестве основы устройства для сокращения временной длительности оптических импульсов, а также для нелинейного сложения импульсов, вводимых в каждую сердцевину.

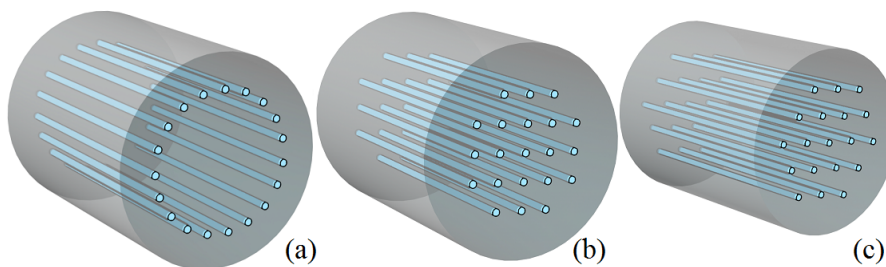


Рис. 1. Схемы рассматриваемых многосердцевинных световодов: (а) кольцевой световод, (б) гексагональный, (в) квадратный.

## Использованные алгоритмы

Электромагнитное поле в многосердцевинном оптическом волокне может быть представлено в виде

$$E(x, y, z, t) = \sum_k A_k(z, t) F_k(x - x_k, y - y_k) e^{i(\beta_k z - \omega t)} + cc, \quad (1)$$

где  $F$  — распределение поля моды, а  $A_l$  — огибающая электромагнитного импульса в  $l$ -м ядре. Для описания распространения и взаимодействия импульсов вдоль многосердцевинного волновода может быть использована система линейно связанных нелинейных уравнений Шредингера (НУШ) на огибающие  $A_l$ , аналогичная дискретному уравнению

Шредингера с кубической нелинейностью и второй производной по времени:

$$i \frac{\partial A_k}{\partial z} = \frac{\beta_2^k}{2} \frac{\partial^2 A_k}{\partial t^2} - \gamma_k |A_k|^2 A_k - \sum_{m=1}^N C_{km} A_m. \quad (2)$$

Здесь  $\beta_2$  — параметр дисперсии групповой скорости,  $\gamma_l$  — параметр Керра, а  $C_{lm}$  представляют собой коэффициенты связи между ядрами.

Были разработаны эффективные численные методы для решения данной системы НУШ, адаптированные для высокопроизводительных вычислительных комплексов. Первый предложенный алгоритм основан на методе расщепления и использовании аппроксимации Паде матричной экспоненты. Другой численный метод представляет собой обобщение компактной диссипативной схемы для систем НУШ. Каждый из этих численных методов в своей реализации использовал математическую библиотеку **Intel MKL**. В частности использовались функции из компонент DFT, BLAS, LAPACK и VML. Сборка осуществлялась при помощи Intel C++ Compiler. Для распараллеливания алгоритмов использовалась связка MPI + OpenMP.

На основе этих численных алгоритмов реализованы два вычислительных программных комплекса для решения задач распространения света в многосердцевинных световодах:

1. Чеховской И.С., Штырина О.В., Федорук М.П. Программный комплекс моделирования многоядерных световодов «MultiCoreFiber-1» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610111 от 12.01.2015 г.
2. Чеховской И.С., Штырина О.В., Федорук М.П. Программный комплекс моделирования многоядерных световодов «MCF-MPI» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663750 от 11.12.2017 г.

## Полученные результаты

В рамках проделанной работы проведено исследование нелинейных волновых эффектов, возникающих в многосердцевинных световодах при распространении по ним оптических импульсов. Было проведено исследование различных типов многосердцевинных световодов и осуществлен поиск наиболее оптимальных конфигураций сердцевин, определены параметры оптических импульсов, вводимых в световод, при которых достигается наиболее эффективное нелинейное сжатия и сложение данных оптических.

Для анализа сжатия и сложения импульсов в кольцевых световодах в качестве начальных импульсов использовались Гауссовы импульсы с немного возмущенными амплитуда-

ми для инициализации начальной неустойчивости:

$$U_k(0, t) = \sqrt{P} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \left[1 + M \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)\right], \quad k = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где  $M$  представляет собой коэффициент модуляции. Для моделирования было выбрано значение  $M = 0.3$ . Результаты моделирования 19-сердцевинного световода с круговым расположением сердцевин показали принципиальную возможность сокращения временной длительности импульсов до 710 раз. Было продемонстрировано сложение до 82% введенной в световод энергии в пределах одной сердцевин. Было показано, что эффективность сложения и сжатия импульсов с помощью кольцевых световодов возрастает с увеличением числа сердцевин, но результаты становятся чувствительными к начальным условиям. Кроме того, требуемая длина световода растет с числом сердцевин. Также показано, что условия для оптимального сложения существенно отличаются от оптимальных условий для сжатия импульсов.

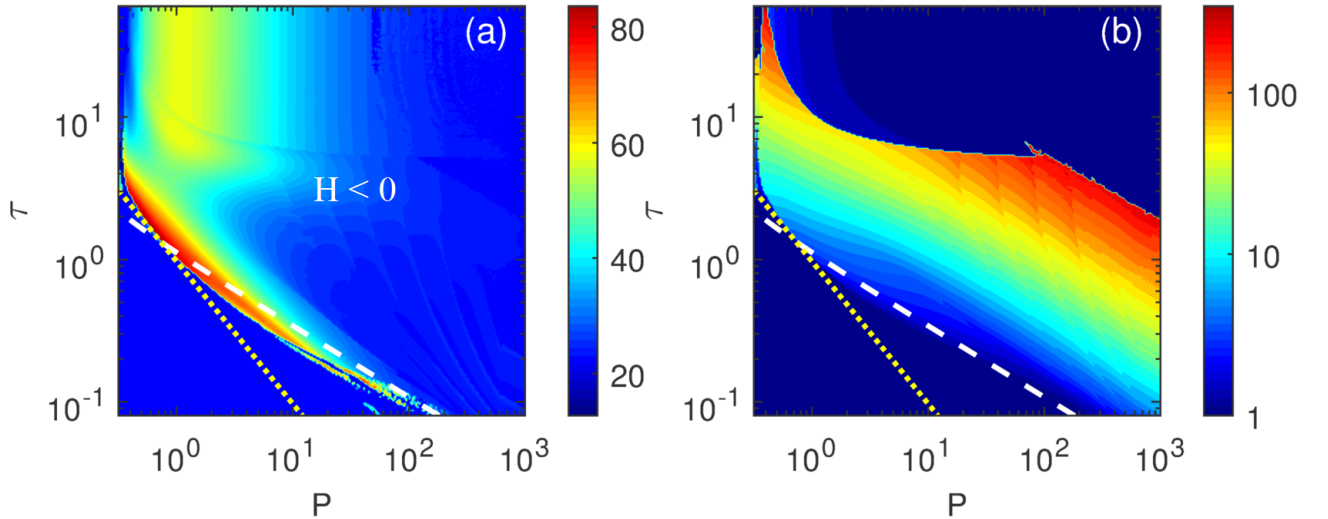


Рис. 2. Эффективность сложения Гауссовских импульсов (3) (в процентах) (a) и коэффициент сжатия в логарифмическом масштабе (b) в зависимости от амплитуды  $P$  и ширины  $\tau$  Гауссовских импульсов в случае 7-сердцевинного кольцевого световода и при коэффициенте модуляции  $M = 0.3$ . Изолиния суммарной энергии Гауссовских импульсов  $E = 4\pi$  изображена желтыми точками, а уровень нулевого значения Гамильтониана  $H = 0$  отмечен белой штриховой линией.

Лучших показателей в плане в сложения импульсов удалось достичь с помощью световодов с гексагональным расположением сердцевин. Путем оптимизации ширины и амплитуды начальных Гауссовых импульсов

$$U_{n,m}(z = 0, t) = \sqrt{P} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (4)$$

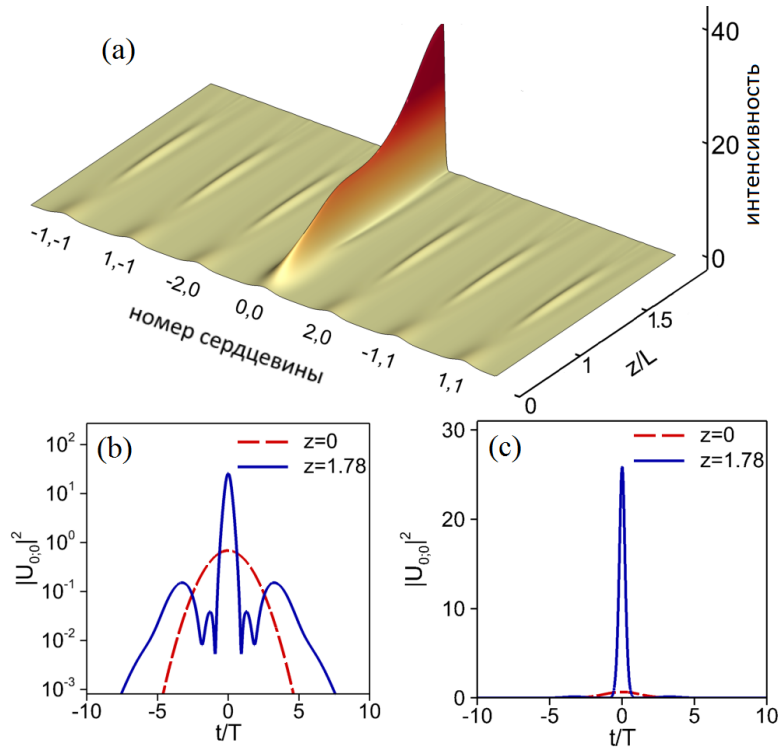


Рис. 3. Динамика распространения Гауссовских импульсов (4) с параметрами  $P = 0.687$ ,  $\tau = 1.775$ , введенных во все сердцевины 7-сердцевинного гексагонального световода (режим лучшего сложения импульсов) (a). Соответствующее начальное распределение интенсивности в центральной сердцевине (штриховая красная линия) и распределение в точке максимального сложения (сплошная синяя линия) в логарифмическом (b) и обычном (c) масштабах. Эффективность сложения в центральной сердцевине – 91.6%. Ширина импульса на полувысоте (FWHM) при этом сокращается в 6.37 раз, а пиковая мощность возрастает в 37.7 раз.

найлены режимы, при которых оказывается возможным с помощью 7-сердцевинного гексагонального световода складывать импульсы с эффективностью 91.6%, а также сжимать их на величину до 256 раз. В случае 19-сердцевинного гексагонального световода были найдены режимы, обеспечивающие эффективность сложения, равную 80.9%, и сжатие до 250 раз.

Для волокон с гексагональной конфигурацией сердцевин проведено исследование влияния различных случайных возмущений вводимых импульсов на режимы оптимального сложения и сжатия. В частности, изучалось влияние расхождения фаз вводимых Гауссовых импульсов. Оказалось, что при максимальном расхождении фаз вводимых импульсов, не превышающем  $2\pi/5$ , процесс сложения с помощью 19-сердцевинного гексагонального световода сохраняет свою устойчивость. Кроме того, было исследовано влияние временных задержек между импульсами на предложенную схему сложения. Процесс остается устойчивым при максимальном временном расхождении вводимых импульсов, не превы-

шающем  $2\tau$ , где  $\tau$  – ширина каждого вводимого оптического импульса.

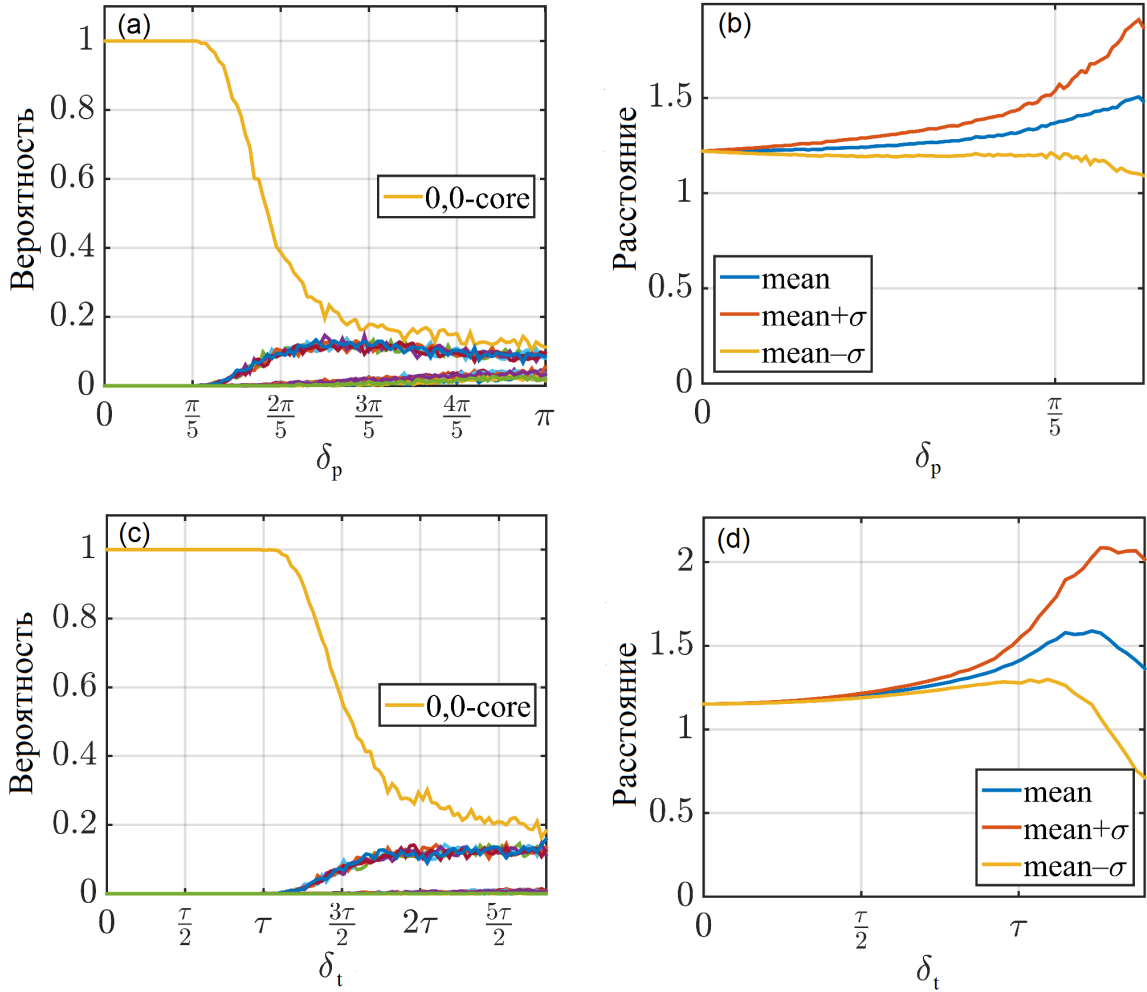


Рис. 4. Влияние расхождения фаз начальных импульсов и временных задержек между ними на схему сложения. Зависимость вероятности сложения в определенной сердцевине 19-сердцевинного гексагонального световода от величины максимального расхождения фаз  $\delta_p$  (a) и величины максимальных временных задержек между импульсами  $\delta_t$  (b) для начальных Гауссовских импульсов с амплитудами  $P = 0.53$  и ширинами  $\tau = 1.8$ . Соответствующее среднее значение (mean) и стандартное отклонение ( $\sigma$ ) расстояния до точки сложения импульсов (b,d). Все величины получены путем усреднения результатов моделирования по 1000 запускам.

Кроме этого были получены результаты по влиянию положительной линейной частотной модуляции (чирпа) на эффективность нелинейного сложения импульсов с помощью гексагональных световодов. Было продемонстрировано, что добавление положительного чирпа к вводимым импульсам существенно увеличивает эффективность предлагаемой схемы. Так с помощью 7-сердцевинного световода оказалось возможным сложение в центральной сердцевине 99.58% полной энергии всех 7-ми введенных импульсов, что является крайне важным практическим результатом. Для 19-сердцевинного световода максималь-

ная эффективность оказалась немного ниже и равнялась 97.4%. В случае 37-сердцевинного световода она была около 93.35%. Длительность генерируемых в центральной сердцевине импульсов при этом сокращалась на величину до 15 раз.

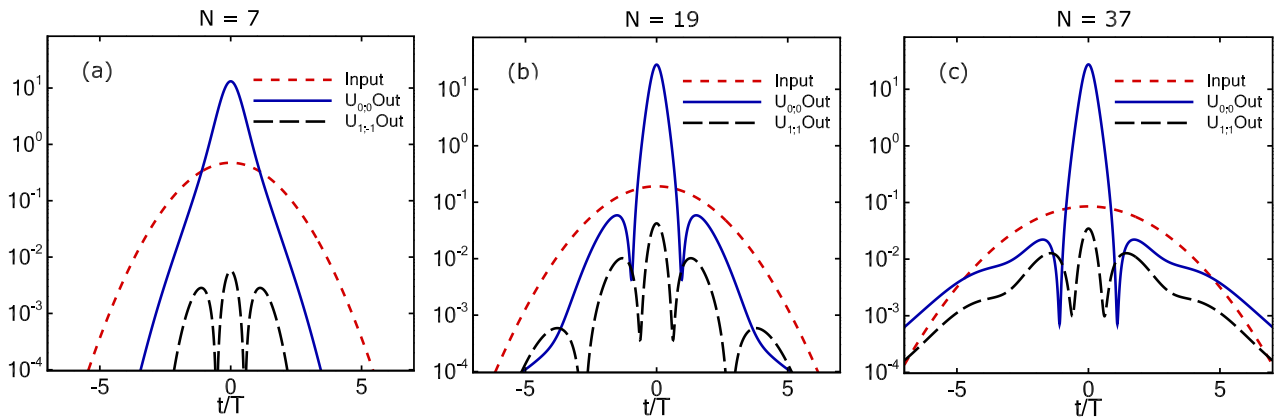


Рис. 5. Формы начальных чирпованных импульсов (красные штриховые линии) и формы сложенных импульсов в центральной сердцевине (синие сплошные линии) и в соседних периферийных сердцевинах (черные штриховые линии), при которых достигается наибольшая эффективность сложения с помощью гексагональных световодов с  $N$  сердцевинами.

Также продемонстрирована возможность эффективного сложения оптических импульсов с помощью 7-сердцевинного гексагонального световода в одной из его периферийных сердцевин. С использованием генетического алгоритма определены режимы, обеспечивающие максимальную эффективность сложения при заданных ограничениях на характеристики начальных импульсов. Всего было исследовано два подхода к определению параметров Гауссовых импульсов, при которых сложенный импульс может быть получен в одной из периферийных сердцевин 7-сердцевинного световода.

Первый подход заключается в подборе величины амплитуды каждого оптического импульса в отдельности. Ширина и чирп у всех импульсов при этом одинаковые. Они также подбираются с целью максимизации эффективности сложения импульсов. Начальные фазы у всех импульсов равны нулю. Таким образом, общее число параметров в решаемой оптимизационной задаче равняется 7. Оказалось, что если амплитуды вводимых импульсов отличаются друг от друга не более чем в 2 раза (а пиковые мощности тогда в 4 раза), то максимальная эффективность сложения таких импульсов, которой можно добиться, равняется 28%. Если же амплитуды отличаются не более чем в 5 раз, максимальная эффективность равняется 53%. В случае расхождения величин амплитуд в 10 раз максимальная эффективность оказывается около 69%.

Второй подход более сложен с технической точки зрения, так как требует контроля фаз



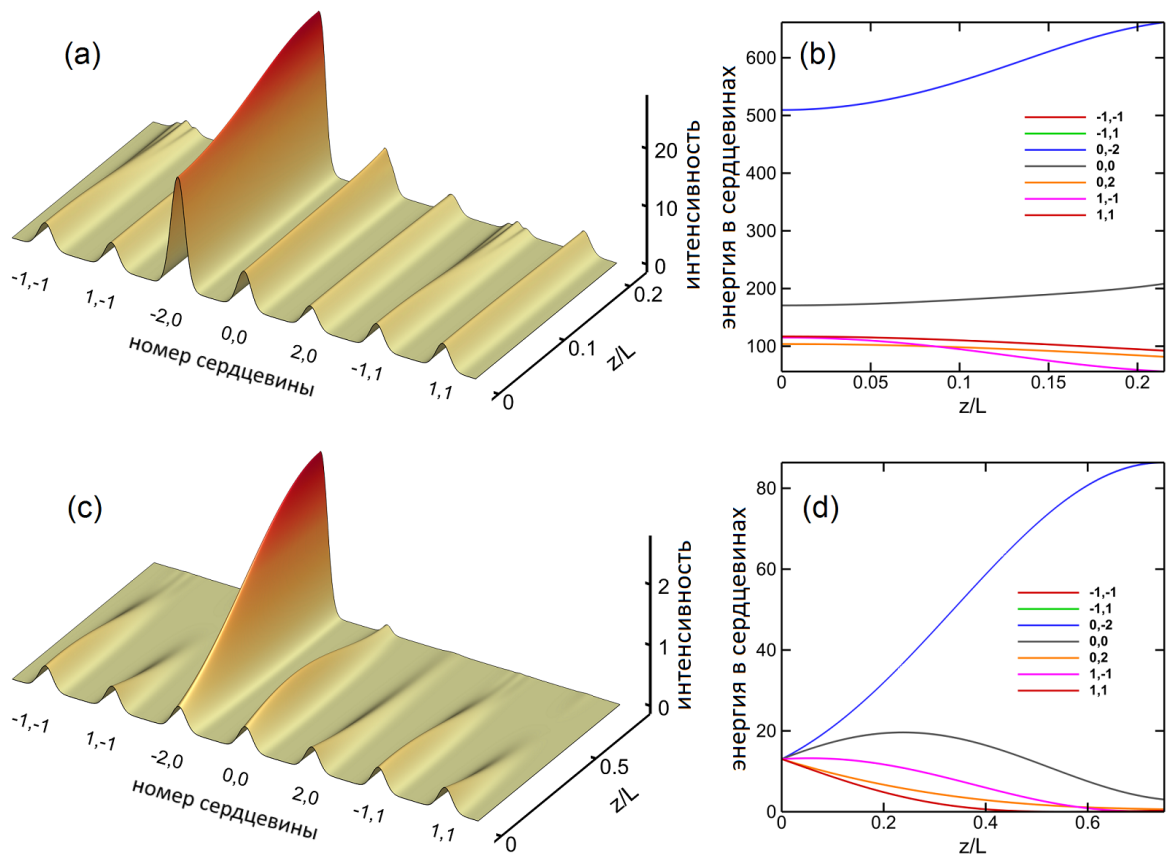


Рис. 6. Динамика интенсивности оптических импульсов и энергии по сердцевинам для решений, полученных генетическим алгоритмом: с использованием модуляции амплитуд (a,b) и с помощью подбора фаз вводимых импульсов (c,d).

начальных импульсов. Предлагается сделать одинаковыми у всех вводимых импульсов амплитуду, ширину и чирп и подбирать фазу каждого импульса в отдельности. Таким образом максимизировать эффективность сложения импульсов в периферийной сердцевине путем подбора 8 параметров. В итоге с помощью генетического алгоритма был получен режим, при котором возможно сложение 95% энергии всех введенных импульсов.

## Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Расчеты проводились для большого количества различных значений параметров, поэтому использование кластера существенно сократило время получения результатов. В случае каждого из рассмотренных световодов поиск оптимального значения параметров гауссовых импульсов, при которых достигается максимальная эффективность сложения импульсов или наибольшее сокращение их длительности, требовал проведения порядка 60 тысяч отдельных расчетов динамики распространения электромагнитных импульсов в данном световоде. Запуск расчетов осуществлялся с помощью динамического планиров-

щика, использующего библиотеку MPI. На каждом процессорном ядре запускался отдельный расчет распространения оптического импульса. С помощью кластера такую задачу удалось решить примерно за двое суток. В случае гексагональных световодов можно было использовать симметрию расположения сердцевин, поэтому длительность расчетов можно было сократить до нескольких часов. Например, в случае 7-сердцевинного световода можно численно решать только 2 уравнения (на центральную и одну из периферийных сердцевин) вместо 7-ми.

Исследование влияния различных стохастических флуктуаций на процесс сложения импульсов требовало набора большой статистики. Один расчет мог включать до 1–2 миллионов отдельных расчетов распространения импульсов вдоль рассматриваемого световода. Поэтому в данном случае без наличия вычислительных ресурсов ИВЦ НГУ решить задачу было бы крайне сложно.

## Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers / A. M. Rubenchik, I. S. Chekhovskoy, M. P. Fedoruk et al. // *Opt. Lett.*—2015.—Vol. 40, No. 5.—P. 721–724 (Импакт-фактор 3.589).

2. Чеховской, И. С. Использование аппроксимации Паде для решения систем нелинейных уравнений Шредингера с помощью метода расщепления по физическим процессам / И. С. Чеховской // *Вычислительные технологии.* — 2015. — Т. 20, № 3. — С. 99–108 (Импакт-фактор 0.507).

3. Nonlinear combining and compression in multicore fibers / I. S. Chekhovskoy, A. M. Rubenchik, O. V. Shtyrina et al. // *Phys. Rev. A.*—2016.—Vol. 94.—P. 043848 (Импакт-фактор 2.714).

4. Numerical approaches to simulation of multi-core fibers / I. S. Chekhovskoy, V. I. Paasonen, O. V. Shtyrina, M. P. Fedoruk // *Journal of Computational Physics.* — 2017. — Vol. 334.—P. 31–44 (Импакт-фактор 2.864).

5. И. С. Чеховской, М. А. Сорокина, А. М. Рубенчик, М. П. Федорук, “Пространственно-временное мультиплексирование на основе гексагональных многосердцевинных световодов”, *Квантовая электроника*, 47:12 (2017), 1150–1153 [*Quantum Electron.*, 47:12 (2017), 1150–1153] (Импакт-фактор 1.151).

6. I. S. Chekhovskoy, M. A. Sorokina, A. M. Rubenchik, M. P. Fedoruk and S. K. Turitsyn, "On Demand Spatial Beam Self-Focusing in Hexagonal Multicore Fiber," in *IEEE Photonics*

Journal, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, Feb. 2018, Art no. 7101408 (Импакт-фактор 2.291).

7. I. S. Chekhovskoy, A. M. Rubenchik, O. V. Shtyrina, M. A. Sorokina, S. Wabnitz, and M. P. Fedoruk, "Nonlinear discrete wavefront shaping for spatiotemporal pulse compression with multicore fibers," J. Opt. Soc. Am. B 35, 2169-2175 (2018) (Импакт-фактор 2.048).

**Впечатления от работы вычислительной системы и деятельности  
ИВЦ НГУ, а также предложения по их совершенствованию**

Впечатления только положительные!