

## **Название статьи:**

Исследование взаимодействия спектральной фильтрации и медленного насыщающегося поглощения на формирование коротких импульсов в волоконных лазерах

## **Авторы:**

А.Ю. Кохановский, А.Е. Перепелов, К.В. Серебренников

## **Аннотация:**

В работе исследуется процесс формирования сверхкоротких импульсов в волоконном лазерном резонаторе с эффектом медленного насыщающегося поглощения и спектральной фильтрацией. Установлено, что в резонаторе с полной нормальной хроматической дисперсией конечное время релаксации насыщающегося поглотителя приводит к спектральному смещению генерируемых импульсов по отношению к центральной длине спектрального фильтра. Численные результаты верифицированы с помощью двух экспериментальных лазерных источников: кольцевого волоконного лазера с насыщающимся полупроводниковым зеркалом и волоконного лазера с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом. Полученные результаты актуальны для проектирования источников сверхкоротких импульсов в приложениях, для которых спектральные свойства излучения ключевыми.

## **Ключевые слова:**

Волоконные лазеры, синхронизация мод, насыщающийся поглотитель, спектральная фильтрация, диссипативные солитоны

## **Текст статьи:**

### **1. Введение**

Волоконные лазеры с синхронизацией мод резонатора активно используются в качестве источников сверхкоротких импульсов во многих научных и технологических приложениях [1-3]. Специальный класс импульсов, диссипативных солитонов, особенно важен для приложений, в которых требуются высокие пиковые мощности и энергии оптического поля

[4,5]. Диссипативные солитоны могут обладать энергиями порядка 10 мкДж [6] и благодаря линейному chirпу могут быть сжаты вне резонатора и обладать пиковой мощностью вплоть до несколько МВт без использования дополнительных каскадов усиления [7].

Несмотря на успехи в исследовании условий формирования диссипативных солитонов в волоконных резонаторах, их проектирование остается нетривиальной научной и инженерной задачей [8, 9]. В первую очередь это связано с большим количеством контролируемых параметров лазерной системы и нелинейной динамикой взаимодействий оптических эффектов, возникающих в процессе распространения излучения в волоконном световоде, включая эффект Керра, вынужденное комбинационное рассеяние, хроматическую дисперсию и т.д. По этой причине проводятся интенсивные исследования по выявлению зависимостей свойств генерируемых диссипативных солитонов от параметров волоконного резонатора [10-13].

Среди исследований можно выделить цикл работ, посвященных влиянию параметров насыщающегося поглотителя на генерацию диссипативных солитонов. Насыщающийся поглотитель помимо инициации импульсного излучения существенно влияет на спектрально-временные свойства импульсного излучения из – за своего нелинейного отклика. В работе [14] было установлено, что большое время релаксации насыщающегося поглотителя вносит асимметрию в спектральный профиль генерируемых импульсов. Дальнейшее исследование авторов показали, что время релаксации поглотителя влияют нетривиальным образом на спектральную ширину, длительность, энергию и стабильность импульсной генерации [15]. Глубина модуляции насыщающегося поглотителя в зависимости от величины хроматической дисперсии резонатора может определять условия стабильной импульсной генерации [16]. Наконец, форма зависимости пропускания насыщающегося поглотителя от мощности проходящих импульсов влияет на динамику изменения пиковой мощности диссипативных солитонов при увеличении их энергии [17].

Отметим, что большинство работ рассматривало влияние насыщающегося поглотителя на параметры диссипативных солитонов отдельно от других элементов резонатора. В данной работе, мы фокусируем наше исследование на взаимном влиянии насыщающегося поглотителя

и спектрального фильтра на формирование диссипативных солитонов в волоконных резонаторах. Далее определены условия, в которых стабилизация солитонной генерации обусловлена балансом оптического усиления в резонаторе и спектральных потерь на фильтре и насыщающемся поглотителе.

## 2. Лазерная система

На Рис.1. представлена схема кольцевого волоконного лазера с синхронизацией мод, использовавшаяся в численных и экспериментальных исследованиях.

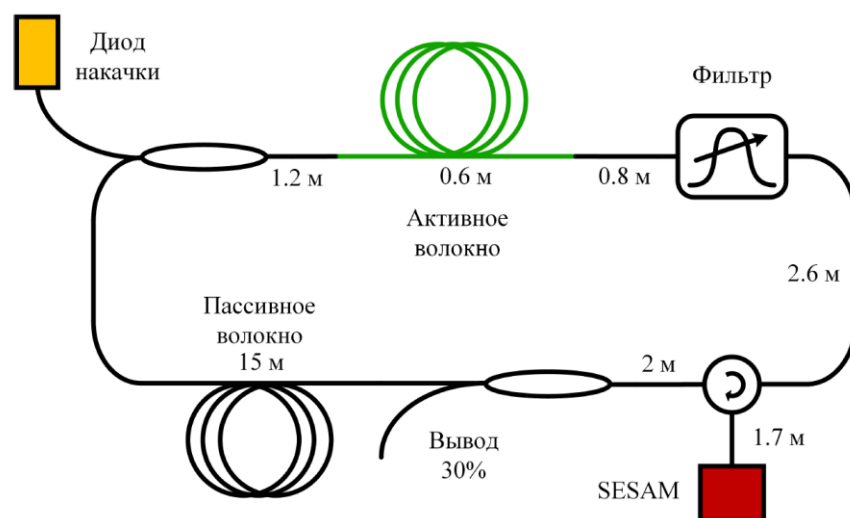


Рисунок 1. Схема волоконного кольцевого лазерного резонатора с насыщающимся полупроводниковым зеркалом и спектральным фильтром.

Экспериментальная кольцевая схема резонатора включала в себя усиливающее волокно, легированное ионами иттербия (nlight Yb 700/6) длиной 30 см. Накачка усиливающего волокна обеспечивалась одномодовым лазерным диодом (II-V CM96Z) с центральной длиной волны 976 нм, излучение которого заводилось в усиливающее волокно с помощью волоконного спектрального объединителя. Спектральная фильтрация обеспечивалась перестраиваемым фильтром OzOptics VTF-100-11, который позволял варьировать полосу пропускания в диапазоне от 0.2 – 18 нм и центральную длину волны пропускания от 1030 – 1060 нм. В качестве пассивного световода использовался световод марки PM-980 с диаметром сердцевины 6 мкм и длиной 15 м. Однонаправленное распространение излучения внутри резонатора обеспечивал волоконный циркулятор, который блокировал быструю ось поляризации. Второй порт циркулятора соединялся с насыщающимся полупроводниковым

зеркалом Vator SAM1064 с временем релаксации 15 пс. Из резонатора выводилось 30% оптического излучения волоконным ответвителем. Все элементы лазерного резонатора поддерживали состояние поляризации оптического излучения. Измерительная система включала 16-ГГц осциллограф Tektronix DPO71604C, анализатор оптического спектра Yokogawa AQ6370D со спектральным разрешением 0,02 нм для анализа оптического спектра и измеритель оптической мощности PM400K5.

Для более глубокого понимания динамики формирования импульсов мы использовали численную модель, основанную на численном решении нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), которое описывает распространение света в среде с хроматической дисперсией и эффектом Керра [18]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2A,$$

где  $A$  - медленно меняющаяся огибающая оптического сигнала  $\alpha = 0.2$  дБ/км — линейные оптические потери волокна,  $\beta_2 = 25.5$  пс<sup>2</sup>/км,  $\gamma = 4.5$  Вт<sup>-1</sup>км<sup>-1</sup>. Уравнения распространения решались численно с помощью симметричного метода Фурье расщепления по физическим процессам. Для моделирования распространения излучения через усиливающее волокно в НУШ добавлялось слагаемое, описывающее эффект насыщающегося поглощения:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma|A|^2A + \frac{g/2}{1 + E/E_{sat}}A,$$

где  $g$  – дифференциальный оператор, который является Фурье-преобразованием лоренцевского профиля усиления волокна при слабом сигнале  $g(\omega) = g_0/(1 + \omega^2/\Omega^2)$ ,  $g_0$  – коэффициент усиления малого сигнала,  $\omega$  – круговая частота оптического излучения,  $\Omega$  – спектральная ширина усиления,  $E$  – энергия импульса,  $E_{sat}$  – энергия насыщения активного волокна.

Для расчета коэффициента поглощения насыщающегося поглотителя использовались результаты решения следующей динамической формулы [19]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_0 - u(t)}{\tau} - \frac{u(t)I(t)}{F_{sat}}u,$$

где  $u$  – коэффициент поглощения,  $u_0$  – ненасыщенный коэффициент поглощения,  $I(t)$  – интенсивность проходящего оптического излучения,  $\tau$  – время релаксации поглотителя,  $F_{sat}$  – энергия насыщения поглотителя.

Моделирование спектральной фильтрации осуществлялось умножением Фурье-образа амплитуды поля на функцию пропускания, выраженной функцией супергаусса  $m$ -го порядка:

$$f(\omega) = \sqrt{T_0} \exp\left(-\frac{1}{2} \left| \frac{\omega}{\Omega_{filter}} \right|^m\right),$$

где  $\Omega_{filter}$  – полоса пропускания спектрального фильтра на полувысоте.

### 3. Результаты

При численном исследовании лазерной схемы первым шагом был поиск параметров волоконного резонатора, обеспечивающих стабильную генерацию диссипативных солитонов. Устойчивое решение было найдено при следующих параметрах: полоса пропускания спектрального фильтра 9.5 нм, общая длина резонатора 25,6 м, коэффициент усиления малого сигнала 21.87 дБ/м, энергия насыщения 13 пкДж, полоса усиления активного волокна 100 нм, коэффициент линейных потерь насыщающегося поглотителя 0.31, энергия насыщения поглотителя 8.7 пкДж, время релаксации поглотителя 15 пс. Параметры насыщающегося поглотителя были выбраны исходя из спецификации полупроводникового насыщающегося поглотителя, используемого в эксперименте. Временное распределение найденного решения представлено на Рис. 2(а), длительность диссипативного солитона на полувысоте составила 15.18 пс. Численное моделирование позволило построить эволюцию спектра оптического излучения в процессе обхода резонатора. Рис. 2(б) демонстрирует последовательный спектральный сдвиг оптического излучения при обходе волоконного резонатора вплоть до 300 обхода, после чего сдвиг ограничивается спектральным фильтром и генерация диссипативного солитона стабилизируется.

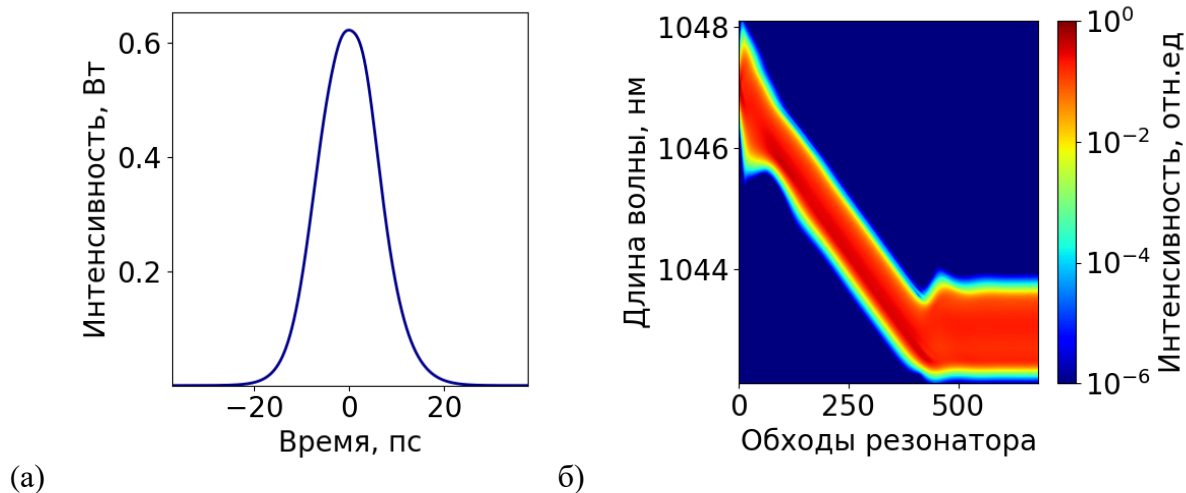


Рисунок 2 – (а) Временное распределение диссипативного солитона (б) Эволюция оптического спектра оптического излучения при обходе лазерного резонатора.

Механизм спектрального сдвига заключается в различном коэффициенте пропускания медленного насыщающегося поглотителя для коротковолновой и длинноволновой части солитона. Данный эффект возникает из – за разного временного расположения спектральных компонент солитона. Передний фронт импульса с длинноволновыми компонентами солитона испытывают большие потери и насыщают поглотитель, постепенно увеличивая его коэффициент пропускания. Поэтому коротковолновые компоненты солитона, находящиеся на заднем фронте импульса, испытывают меньшие потери. Рис. 3. демонстрирует спектральную зависимость коэффициента поглощения спектрального фильтра и полупроводникового насыщающегося зеркала при стабильной генерации диссипативного солитона. На графике также отображен оптический спектр диссипативного солитона. Рис.3. наглядно показывает, что ширина оптического спектра диссипативного солитона определяется в коротковолновой области профилем поглощения спектрального фильтра, в длинноволновой области профилем поглощения насыщающегося поглотителя.

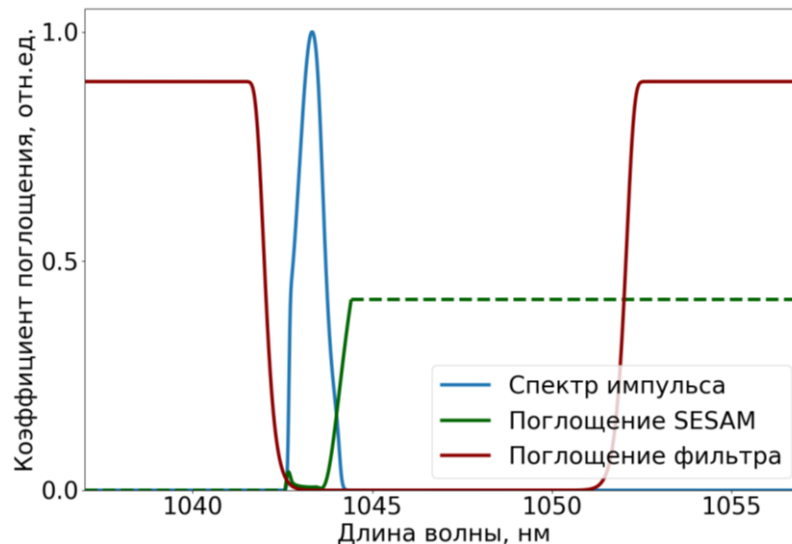


Рисунок 3 — Спектральная зависимость коэффициентов поглощения оптического спектрального фильтра (красная линия), насыщающегося полупроводникового зеркала (зеленая линия). Синей линией обозначен оптический спектр генерируемого диссипативного солитона.

Отметим, что в случае генерации диссипативных солитонов в волоконном резонаторе с аномальной дисперсией [20] спектральный сдвиг солитона ожидается в длинноволновую область.

Рис. 4 демонстрирует зависимость спектрального сдвига диссипативного солитона по отношению к центральной длине волны пропускания спектрального фильтра от времени релаксации насыщающегося поглотителя. Для верификации полученных численных результатов была создана экспериментальная лазерная система с параметрами численной модели кольцевого резонатора. Частота повторения импульсов составила 8,1 МГц, средняя мощность излучения 1.23 мВт. На Рис. 5 (а) приводится оптический спектр диссипативного солитона, сгенерированного в кольцевом лазерном резонаторе с насыщающимся полупроводниковым зеркалом с временем релаксации 15 пс. Спектральный сдвиг солитона относительно центральной длины волны спектрального фильтра составил 2.73 нм.

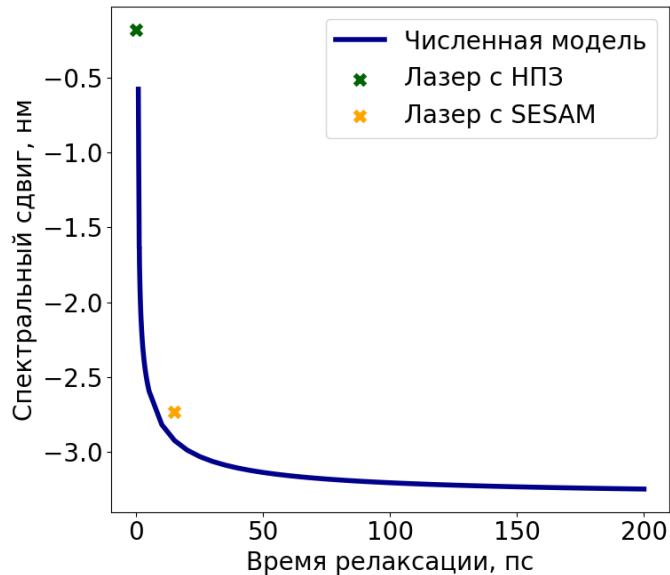


Рисунок 4 – Зависимость спектрального сдвига диссипативного солитона относительно центральной длины волны спектрального фильтра от времени релаксации полупроводникового насыщающегося поглотителя.

Детальная экспериментальная проверка зависимости на Рис. 4. потребовала бы наличия большого количества насыщающихся поглотителей с разными значениями времени релаксации. Поэтому мы выбрали волоконный лазер с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом как предельный вариант лазерной системы с быстрым насыщающимся поглотителем. Время релаксации петлевого зеркала определяется временем релаксации эффекта Керра, не превышающей нескольких фемтосекунд [21]. Устройство исследуемого лазера описано в работе [22]. Действительно, в случае применения быстрого насыщающегося поглотителя спектральный сдвиг диссипативного солитона составил 0.18 нм (Рис. 5 (б)).

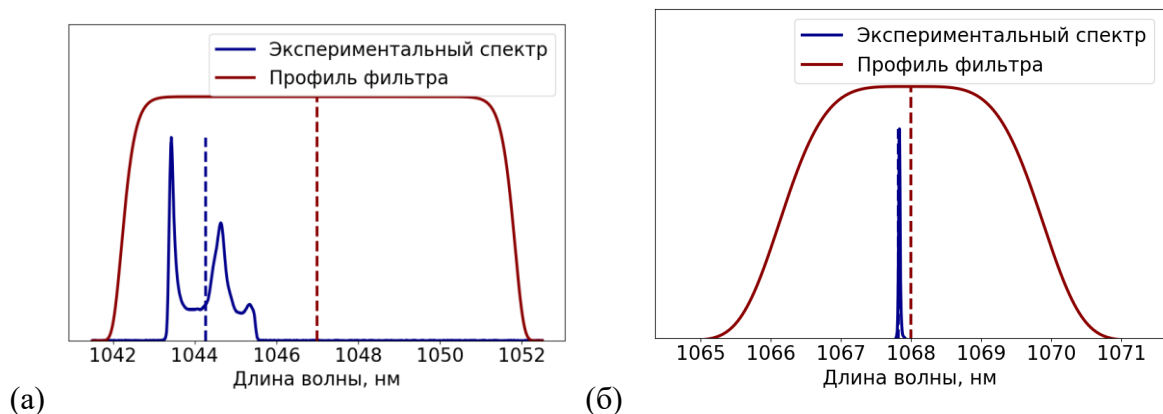


Рисунок 5 – (а) Спектр диссипативного солитона, сгенерированного в волоконном кольцевом резонаторе с медленным насыщающимся полупроводниковым зеркалом (б) Спектр диссипативного солитона, сгенерированного в волоконном лазере с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом.



#### 4. Заключение

В работе исследовалось формирование сверхкоротких импульсов в волоконных лазерных резонаторах с нормальной хроматической дисперсией с медленным насыщающимся поглотителем и спектральной фильтрацией. Продемонстрирован численно и экспериментально режим генерации диссипативных солитонов, при котором большое время релаксации насыщающегося поглотителя, составляющее 15 пс, приводит к спектральному сдвигу выходных оптических импульсов на 2.73 нм в коротковолновую область и ограничивается полосой пропускания спектрального фильтра. Важно отметить, что найденный эффект позволяет сдвигать спектр диссипативных солитонов в коротковолновую область, что принципиально отличает его от эффекта вынужденного комбинационного рассеяния, который обеспечивает перестройку спектра солитонов в длинноволновую область [23]. Учет данного эффекта позволит более точно и эффективно управлять спектральными свойствами генерируемых сверхкоротких импульсов в волоконных источниках, где этот параметр является критически важным.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-42-04401).

#### Список литературы

1. Ma J. et al. *Applied Physics Reviews*, **6**, 2, (2019).
2. Pivtsov V.S. et al. *Quantum Electron.* **44**, 507 (2014).
3. Han, Y. et al. *Progress in Quantum Electronics*, 71, (2020)
4. Rozanov N. N. *Physics-Uspokhi*, **43**, 4, (2000).
5. P. Grelu, N. et al. *Nature Photonics*, **6**,(2012)
6. Semaan G. et al. *Optics letters*, **41**, 20, (2016)
7. Lefrançois. S et al. *Optics Express*, **35**, 10, (2010)
8. Woodward R. I. *Journal of Optics*, **20**, 3, (2018)
9. Kokhanovskiy A. et al. *Scientific reports*, **11**, 1(2021).
10. Zhang O. et al. *Optics Communications*, **335**, (2015)

11. Mkrtchyan A. A. et al. *Journal of Lightwave Technology*, **39**, 17, (2021).
12. Lin, W. et al. *Optics Express*, **23**,11, (2015)
13. N.A.Koliada et al. *Quantum Electronics*, **43**, 2, (2013).
14. Lee J. et al. *Journal of Lightwave Technology*, **38**, 15(2020)
15. Lee J., et al. *Optics Express*, **29**, 14, (2021).
- 16 Jeon J. et al. *JOSA B*, **32**,1(2015)
17. Li D. et al. *Journal of Lightwave Technology*, 33,18, (2015)
18. Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics* (Cambridge: Academic Press, 2012).
19. Weiner A. *Ultrafast optics* (John Wiley & Sons, 2011).
20. Chang, W. et al. *Physical Review A*, **79**, 3, (2009)
21. Boyd R. W. *Nonlinear optics*. (Academic press 2020)
22. Kuprikov E. et al. *Scientific Reports*, **12**, 1, (2022).
23. Bednyakova et al. *Optics Express*, **21**, 18 (2013).

#### **Подписи к рисункам:**

Рисунок 1. Схема волоконного кольцевого лазерного резонатора с насыщающимся полупроводниковым зеркалом и спектральным фильтром.

Рис. 2: Зависимость коэффициента битовых ошибок от ширины свёрточного слоя (а) и нелинейного фильтра (б)

Рисунок 3 — Спектральная зависимость коэффициентов поглощения оптического спектрального фильтра (красная линия), насыщающегося полупроводникового зеркала (зеленая линия). Синей линией обозначит оптический спектр генерируемого диссипативного солитона.

Рисунок 4 – Зависимость спектрального сдвига диссипативного солитона относительно центральной длины волны спектрального фильтра от времени релаксации полупроводникового насыщающегося поглотителя.

Рисунок 5 – (а) Спектр диссипативного солитона, сгенерированного в волоконном кольцевом резонаторе с медленным насыщающимся полупроводниковым зеркалом (б) Спектр

диссипативного солитона, сгенерированного в волоконном лазере с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом.

**Место работы авторов и адреса организаций (русский язык)**

**Кохановский А.Ю.:** email: [alexey.kokhanovskiy@gmail.com](mailto:alexey.kokhanovskiy@gmail.com)

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2;

**Перепелов А.Е.:** email: [a.perepelov@g.nsu.ru](mailto:a.perepelov@g.nsu.ru)

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2;

**Серебренников К.В.:** email: [kospi198@gmail.com](mailto:kospi198@gmail.com)

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2;

**Место работы авторов и адреса организаций (английский язык)**

**Kokhanovskiy A.Yu.:** [alexey.kokhanovskiy@gmail.com](mailto:alexey.kokhanovskiy@gmail.com)

Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia, Pirogova street, 2

**Perepelov A.E.:** [a.perepelov@g.nsu.ru](mailto:a.perepelov@g.nsu.ru)

Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia, Pirogova street, 2

**Serebrennikov K.V. :** [kospi198@gmail.com](mailto:kospi198@gmail.com)

Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia, Pirogova street, 2