

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ С ИЗОБРАЖЕНИЯМИ В АККУМУЛИРОВАННОЙ ЭХО-ГОЛОГРАФИИ

Г. И. Гарнаева*, Л. А. Неведьев, Э. И. Низамова

УДК 535.2+535.317.1

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-562-567>

Институт физики Казанского (Приволжского) федерального
университета, Казань, Россия; e-mail: guzka-1@yandex.ru,
nefediev@yandex.ru, enizamova@yandex.ru

(Поступила 8 апреля 2022)

Рассмотрена возможность реализации логических операций для изображений с использованием аккумулятивной эхо-голограммы при наличии или в отсутствие разности фаз между парами возбуждающих импульсов. Показана возможность осуществления ряда логических операций с изображениями в нановременной области (объединения множеств, разности множеств, пересечения множеств, симметрической разности), что приводит к соответствующей фильтрации и обработке изображений.

Ключевые слова: логическая операция, эхо-голография, симметрическая разность, объединения множеств, пересечение множеств, разность множеств.

The possibility of implementing logical operations for images using accumulated echo-hologram with or without phase difference between pairs of exciting pulses is considered. The possibility for performing a number of logical operations with images in a nano-time domain (union of sets, difference of sets, intersection of sets, symmetric difference) is shown, which leads to appropriate filtering and image processing.

Keywords: logical operations, echo-holography, symmetric difference, union of sets, intersection of sets, difference of sets.

Введение. В последнее время актуальна разработка квантовой памяти [1, 2] с использованием фотонного эха [3]. Для обработки квантовой информации предлагаются логические квантовые гейты. В работе [4] предложена оптическая схема реализации квантового вентиля обобщенно контролируемой фазы, основанная на использовании нерезонансного взаимодействия фотона с трехуровневым атомом в высокодобротном резонаторе. Обсуждаются преимущества предложенного протокола и возможные варианты его экспериментальной реализации. Наибольшую популярность приобрели когерентные оптические методы обработки информации, заложенной в изображениях. Это связано с возможностью фильтрации и преобразования изображений в нановременной области. Особый интерес представляет эхо-голографический процессор, который относится к классу multifunctional аналоговых устройств. Благодаря наличию управляющих сигналов его импульсную характеристику можно программировать в реальном масштабе времени и получать различные виды обработки — от простого запоминания до интегральных преобразований [5].

Оптическая эхо-голография дает возможность реализации логических операций для изображений. В работе [6] рассмотрена реализация логических операций над множествами в виде изображений (пересечения множеств) с использованием стимулированной эхо-голограммы. В [7] представлена реализация операции объединения над множествами в виде изображений с помощью режима аккумулятивной долгоживущей эхо-голограммы (АДЭГ). В [8] показано, что в зависимости от разно-

REALIZATION OF LOGICAL OPERATIONS WITH IMAGES IN ACCUMULATED ECHO-HOLOGRAPHY

G. I. Garnayeva*, L. A. Nefediev, E. I. Nizamova (Kazan Federal University, Kazan, Russia; e-mail: guzka-1@yandex.ru, nefediev@yandex.ru, enizamova@yandex.ru)

сти фаз между возбуждающими парами лазерных импульсов в АДЭГ возможно осуществление логических операций объединения множеств, симметрической разности и их суперпозиции.

В настоящей работе рассмотрена реализация ряда логических операций над изображениями с использованием АДЭГ при наличии и в отсутствие разности фаз между парами возбуждающих лазерных импульсов. Поскольку отклик АДЭГ является суперпозицией откликов от N пар импульсов (со считывающим импульсом), то вклад в него от каждой пары возбуждающих импульсов разный, что дает возможность управления логическими операциями с использованием АДЭГ.

Основные уравнения. Рассмотрим воспроизведение изображений в режиме АДЭГ (две пары возбуждающих импульсов, имеющих или не имеющих разность фаз между ними) (рис. 1). Напряженность электрического поля η -го возбуждающего лазерного импульса, прошедшего через соответствующий транспарант с изображением:

$$E_{\eta}(\mathbf{r}, t) = U_{\eta}(\mathbf{r})e^{i\omega t} + \text{к.с.}, \quad 0 \leq t \leq \Delta t_{\eta}, \quad (1)$$

где Δt_{η} — длительность η -го возбуждающего лазерного импульса; $U_{\eta}(\mathbf{r})$ описывает пространственную структуру η -го возбуждающего лазерного импульса.

Изображение на транспаранте рассматриваем как совокупность точек с радиусами-векторами $\mathbf{r}_n$. Каждая точка излучает сферическую волну. Совокупность волн в месте нахождения j -го оптического центра в образце с радиусом-вектором $\mathbf{r}_{0j}$ дает величину возмущения резонансного перехода оптического центра. Тогда напряженность электрического поля объектного лазерного импульса в точке $\mathbf{r}_{0j}$ можно записать как разложение по сферическим волнам:

$$E_j = \sum_n A_{nj} \frac{e^{i\mathbf{k}_n^{(j)}(\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n)-i\omega t+i\varphi_n}}{|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|}, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_n^{(j)} = \frac{\omega}{c} \mathbf{n}_n$, $\mathbf{n}_n = \frac{\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|}$, φ_n — начальные фазы сферических волн, причем $e^{i\varphi_n}$ можно вклю-

чить в комплексные амплитуды A_{nj} . Если $|\mathbf{r}_{0j}-\mathbf{r}_n|$ значительно больше размеров образца, то разложение (2) по сферическим волнам переходит в разложение по плоским волнам:

$$E_j = \sum_n \varepsilon_n^{(j)} e^{i\mathbf{k}_n^{(j)}\mathbf{r}_{0j}-i\omega t}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_n^{(j)}$ — амплитуды напряженности электрического поля плоских волн от отдельных точек объекта.

Поскольку один из каждой пары возбуждающих лазерных импульсов является носителем изображения, пространственный фазовый синхронизм при формировании отклика АДЭГ имеет вид

$$\mathbf{k}_{en}^{(j)} = -\mathbf{k}_{1n'}^{(j)} + \mathbf{k}_{2n''}^{(j)} + \mathbf{k}_{3n'''}^{(j)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{k}_m^{(j)}$ — волновые векторы плоских волн пространственного разложения волновых фронтов объектных лазерных импульсов для каждой j -й пары.

Необходимо отметить, что в отклике АДЭГ проявляются только те компоненты разложения поля отклика, для которых оказываются ненулевыми амплитуды разложения полей возбуждающих импульсов, соответствующие направлениям волновых векторов. Импульсы, не несущие изображений, должны формироваться при их прохождении через транспаранты с матовой структурой для создания достаточного набора плоских (сферических) волн, необходимых для выполнения пространственного фазового синхронизма.

Аналогично [7, 9, 10] пространственно-временная структура отклика АДЭГ описывается как

$$E_{\text{АФЭ}} \sim \sum_{j=1}^n E_j(t, R) e^{i\Delta\varphi_j}, \quad (5)$$

$$E_j \approx \frac{1}{V} \sum_{n', n'', n'''} \int_V dV \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta) d\Delta \sin\theta_1^{(j)} \sin\theta_2^{(j)} \sin\theta_3^{(j)} \times \\ \times \frac{\varepsilon_{1n'}^{*(j)} \varepsilon_{2n''}^{(j)} \varepsilon_{3n'''}^{(j)}}{\left| \sum_{n'} \varepsilon_{1n'}^{*(j)} e^{-i\mathbf{k}_{1n'}^{(j)}\mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n''} \varepsilon_{2n''}^{(j)} e^{i\mathbf{k}_{2n''}^{(j)}\mathbf{r}} \right| \left| \sum_{n'''} \varepsilon_{3n'''}^{(j)} e^{-i\mathbf{k}_{3n'''}^{(j)}\mathbf{r}} \right|} e^{-i(\mathbf{k}_{0n}^{(j)} + \mathbf{k}_{1n'}^{(j)} - \mathbf{k}_{2n''}^{(j)} - \mathbf{k}_{3n'''}^{(j)})\mathbf{r}} e^{i\Delta(t-2\tau_{12}-\tau_{21}-\tau_{11})},$$

где $\theta_1^{(j)}$, $\theta_2^{(j)}$ — площади первого и второго импульсов в j -й паре; θ_3 — площадь считывающего импульса, V — объем возбуждаемой части образца; $g(\Delta)$ — распределение оптических центров по частотам; $\Delta = \omega - \Omega_0$; ω — частота лазерного излучения; Ω_0 — частота резонансного перехода; τ_{12} — промежуток времени между импульсами в первой паре; τ_{21} — промежуток времени между импульсами во второй паре; τ — промежуток времени между парами импульсов; τ_1 — промежуток времени между вторым импульсом во второй паре и считывающим импульсом; $\varepsilon_{in}^{(j)}$ — амплитуды напряженности электрических полей плоских волн пространственного разложения волновых фронтов объектных лазерных импульсов в каждой j -й паре; $\Delta\varphi_j$ — фаза j -й пары относительно первой пары импульсов.

В работе [11] показано, что создание разности фаз $\Delta\varphi_j$ между парами возбуждающих импульсов может приводить к уменьшению или исчезновению частотных модуляций населенностей при формировании отклика, что вызывает его исчезновение. Таким образом, согласно (5), если фазы между парами возбуждающих импульсов отличаются друг от друга на π , то интенсивность сигнала АДЭГ значительно уменьшается для элементов изображений, идентичных на транспарантах в первой и второй парах возбуждающих импульсов (эффект стирания информации). Варьирование фаз дает возможность управления реализацией логических операций с изображениями.

Реализация логических операций с изображениями в отсутствие и при наличии фазовых соотношений. На рис. 1 показана последовательность возбуждающих импульсов, применяемая при реализации логических операций “симметрическая разность”, “объединения множеств”, “разность” и логических операций, являющихся их суперпозицией при наличии или в отсутствие фаз между парами импульсов. Такое возбуждение АДЭГ можно осуществить в кристалле $\text{LaF}_3: \text{Pr}^{3+}$ (переход $^3H_4(0) \rightarrow ^3P_0$, $\lambda = 477.7$ нм), где временной интервал между импульсами в парах составляет десятки наносекунд, а временной интервал между парами и интервал между последней записывающей парой и считывающим импульсом могут достигать десятков минут при гелиевых температурах кристалла [5, 12].

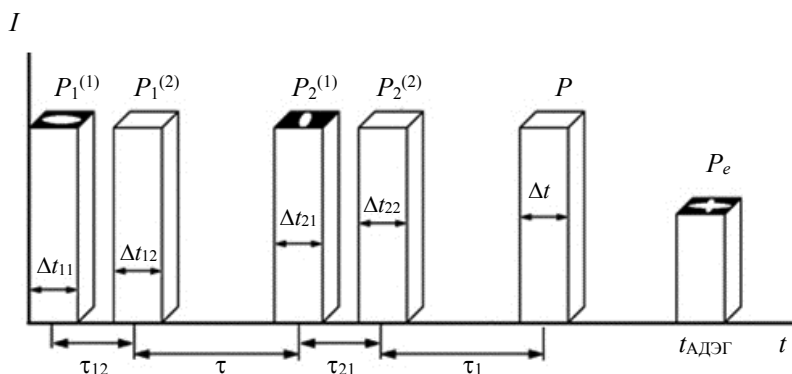


Рис. 1. Последовательность возбуждающих лазерных импульсов при формировании откликов АДЭГ; $\Delta t_{1i} = \Delta t_{2i} = \Delta t$, τ_{12} , τ_{21} , τ , $\tau_1 \ll T_1$, T_2 , где T_1 , T_2 — времена продольной и поперечной необратимой релаксации резонансной системы

Численный расчет отклика АДЭГ (5) показывает, что формируемое изображение является суперпозицией изображений, заложенных в возбуждающие лазерные импульсы, в зависимости от наличия или отсутствия фаз, что приводит к реализации соответствующих логических операций.

Объединением множеств A и B называется множество $(A \cup B)$, состоящее из всех элементов, которые принадлежат хотя бы одному из множеств A , B .

Пересечением множеств A и B называется множество $(A \cap B)$, каждый элемент которого принадлежит и множеству A , и множеству B .

Разностью множеств A и B называется множество (A/B) , состоящее из всех элементов множества A , не принадлежащее множеству B .

Симметрической разностью множеств A и B называется множество $(A \Delta B)$, состоящее из всех элементов, принадлежащих только одному множеству A или B .

Для иллюстрации реализации логических операций в режиме АДЭГ в качестве множеств A , B взяты транспаранты с изображениями (рис. 2). Под множеством A представляем транспаранты, через которые проходят первые возбуждающие лазерные импульсы в каждой паре импульсов, под множеством B — транспаранты, через которые проходят вторые возбуждающие лазерные импульсы в каждой паре импульсов.

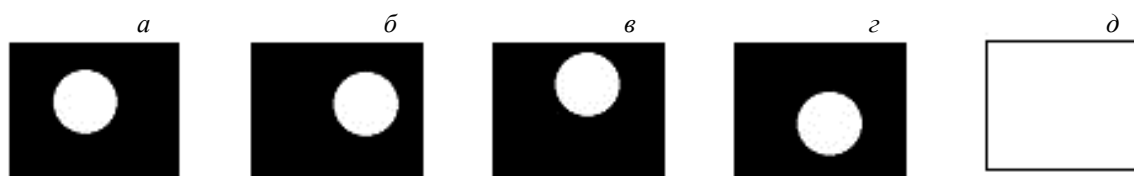


Рис. 2. Транспаранты с изображениями, используемые при возбуждении АДЭГ

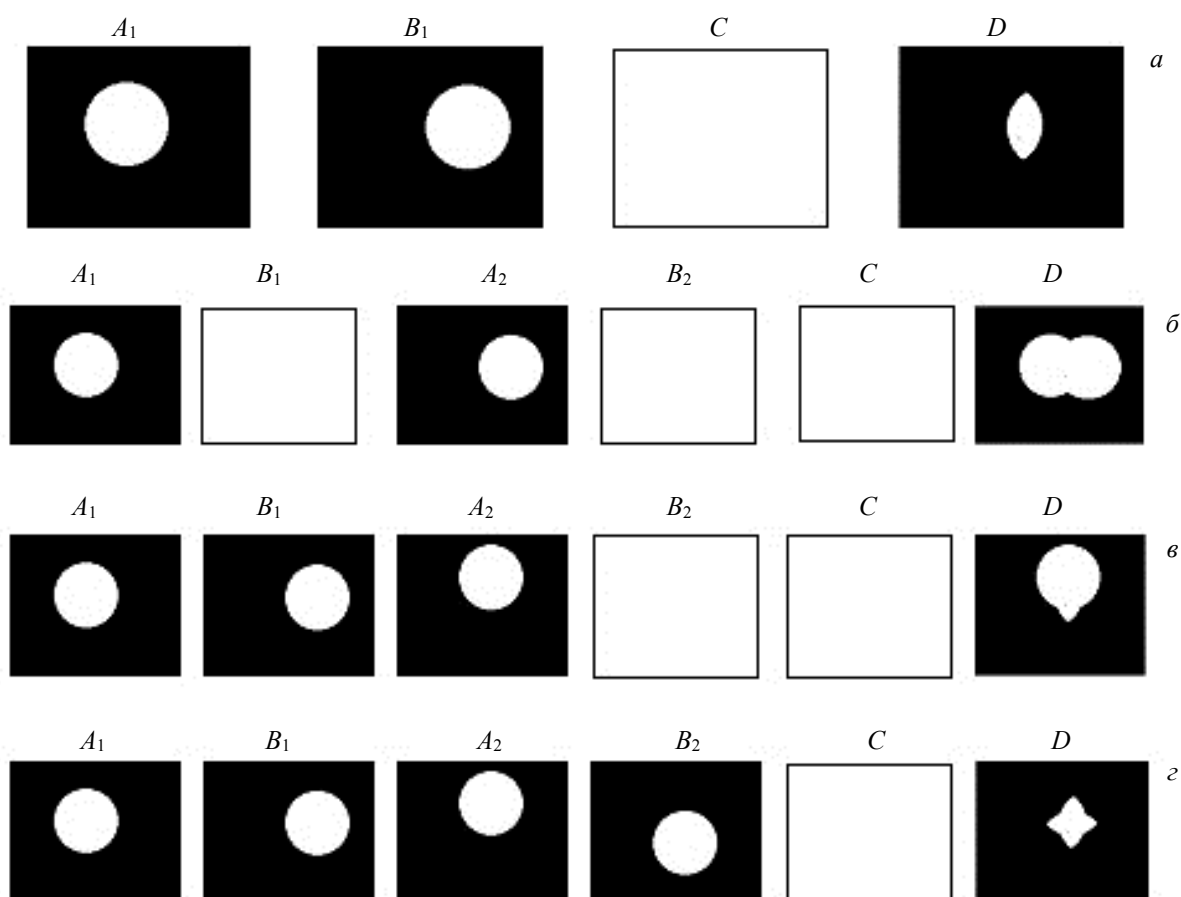


Рис. 3. Реализация логических операций пересечения множеств (*а*), объединения множеств (*б*), совокупности операций пересечения и объединения множеств (*в*), совокупности двух операций пересечения и объединения (*г*)

Результаты численного расчета (5) представлены на рис. 3 и 4. Реализация логической операции с изображениями при $j = 1$ в отсутствие фазы между первой и второй парами импульсов ($\Delta\phi_{12} = 0$), $D = A_1 \cap B_1$ — пересечение множеств, приведена на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* показана реализация логической операции “объединение множеств” ($D = A_1 \cup A_2$) при $j = 2$ и $\Delta\phi_{12} = 0$, в этом случае интегральная интенсивность $I \sim n(A_1 \cup A_2) = n(A_1) + n(A_2)$, где n — количество элементов в данном множестве;

на рис. 3, *в* — совокупность логических операций, таких как пересечение и объединение, т. е. $D = A_1 \cap B_1 \cup A_2$ при $j = 2$ и $\Delta\varphi_{12} = 0$, $I \sim n(A_1 \cup B_1) = n(A_2)$; на рис. 3, *з* — совокупность реализации трех логических операций — пересечения и объединения $D = (A_1 \cap B_1) \cup n(A_2 \cap B_2)$ при $j = 2$ и $\Delta\varphi_{12} = 0$, $I \sim n(A_1 \cup B_1) + n(A_2 \cap B_2)$.

На рис. 4, *а* представлена реализация логической операции с изображениями при $j = 2$ и $\Delta\varphi_{12} = \pi$, т. е. $D = A_1 \Delta A_2$ — симметрическая разность, на рис. 4, *б* — реализация логической операции разности $D = A_1/B_2$ при $j = 2$ и $\Delta\varphi_{12} = \pi$, интегральная интенсивность $I \sim n(A_1/B_2) = n(A_1) - n(A_1 \cap B_2)$. Реализация совокупности логических операций пересечения и симметрической разности возможна при $j = 2$ и $\Delta\varphi_{12} = \pi$ ($D = (A_1 \cap B_1) \Delta (A_2 \cap B_2)$).

Представленные на рис. 3 и 4 отклики в режиме АДЭГ содержат изображения, являющиеся результатом логических операций объединения множеств, разности множеств, пересечения множеств, симметрической разности, а также совокупности представленных логических операций при фазах между парами импульсов, равных нулю и π .

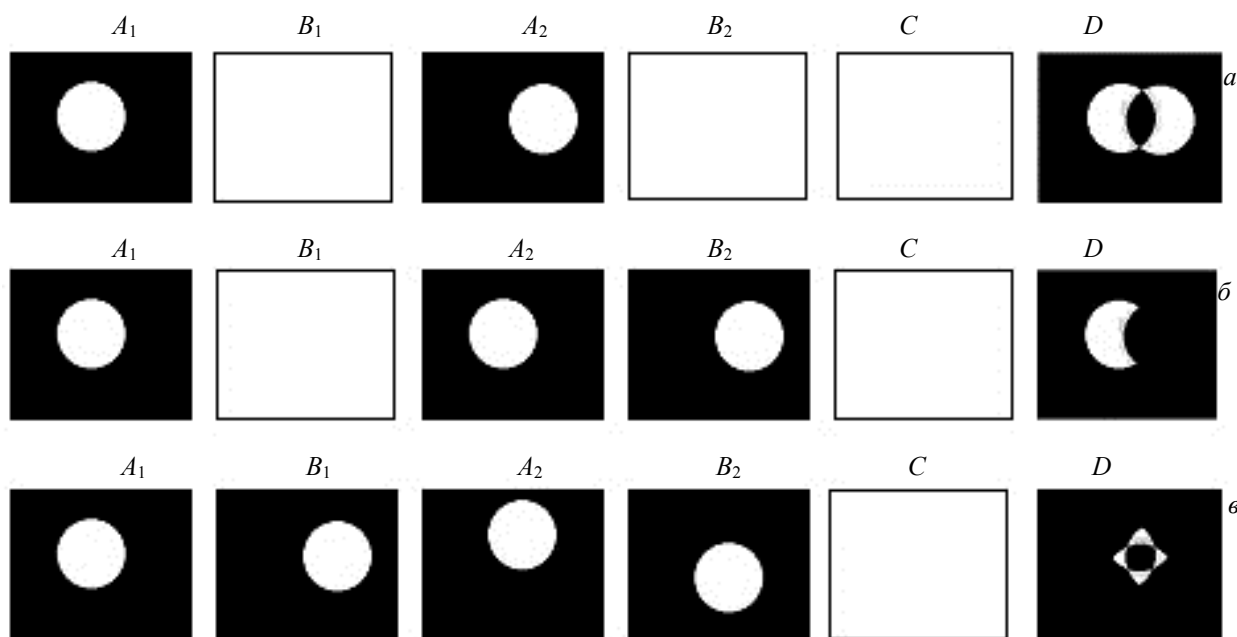


Рис. 4. Реализация логических операций симметрической разности (*а*), разности множеств (*б*), совокупности операций пересечения и симметрической разности (*в*)

В качестве примера практического применения логических операций с изображениями можно привести обработку снимков нескольких местностей, не соприкасающихся друг с другом, или одной местности в разные моменты времени. Для отслеживания обновления снимков, покрывающих эти местности, раньше требовалось скачивать каждый из них отдельно, сейчас можно объединить снимки, описывающие местность, в мультиснимки и работать с ними (скачивать, копировать, экспортировать и т. д.). Это позволяет проводить необходимые действия, запустив процесс лишь один раз, и отслеживать изменения за наносекундные интервалы времени.

Заключение. Рассмотрена реализация логических операций с изображениями с использованием аккумулированной долгоживущей эхо-голограммы при наличии или в отсутствие разности фаз между парами возбуждающих импульсов. Показана возможность осуществления ряда логических операций с изображениями в нановременной области, что ведет к соответствующей фильтрации и обработке изображений.

Работа выполнена за счет средств программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета “Приоритет-2030”.

-
- [1] X. Zhang, W.-T. Liao, A. Kalachev, R. Shakhmurov, M. Scully, O. Kocharovskaya. *Phys. Rev. Lett.*, **123**, N 25 (2019) 250504(1—5)
- [2] С. А. Моисеев, Н. С. Перминов. *Письма в ЖЭТФ*, **111**, № 9-10 (2020) 602—607
- [3] S. A. Moiseev, K. I. Gerasimov, M. M. Minnegaliev, E. S. Moiseev, N. S. Perminov, M. Sabooni, A. Tashchilina, R. V. Urmancheev, A. M. Zheltikov. *Сб. тез. XIII междунар. чтений по квантовой оптике IWQO-2019* (2019) 36—37
- [4] С. А. Моисеев, С. Н. Перминов. *Наноиндустрия*, **13**, S4 (99) (2020) 684—686
- [5] А. А. Калачев, В. В. Самарцев. *Фотонное эхо и его применение*, Казань, КГУ (1998)
- [6] А. Р. Сахбиева, Л. А. Неведьев, Г. И. Гарнаева. *Журн. прикл. спектр.*, **84**, № 3 (2017) 499—503 [A. R. Sakhbieva, L. A. Nefed'ev, G. I. Garnaeva. *J. Appl. Spectr.*, **84**, N 3 (2017) 512—516]
- [7] A. R. Sakhbieva, L. A. Nefediev, Y. A. Nefediev, E. N. Akhmedshina, A. O. Andreev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1283**, N 1 (2019) 012011
- [8] Е. Н. Ахмедшина, А. Р. Сахбиева, Л. А. Неведьев. *Журн. прикл. спектр.*, **87**, № 4 (2020) 653—657 [E. N. Ahmedshina, A. R. Sakhbieva, L. A. Nefediev. *J. Appl. Spectr.*, **87** (2020) 708—711]
- [9] А. А. Калачев, Л. А. Неведьев, В. А. Зуйков, В. В. Самарцев. *Опт. и спектр.*, **84**, № 5 (1998) 811
- [10] G. I. Garnaeva, E. I. Hakimzyanova, L. A. Nefediev, K. L. Nefedieva. *Opt. Spectr.*, **117**, N 2 (2014) 270—275
- [11] N. N. Akhmediev. *Opt. Lett.*, **15**, N 18 (1990) 1035—1037
- [12] E. N. Akhmedshina, A. R. Sakhbieva, L. A. Nefediev, Y. A. Nefediev, A. O. Andreev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1628**, XXIII Int. Youth Scientific School “Coherent Optics and Optical Spectroscopy 2019” (COOS), 29—31 October 2019, Kazan, Russia (2019), doi: 10.1088/1742-6596/1628/1/012001