

УДК 535

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/95

Шифр специальности ВАК: 1.3.6, 1.2.1, 1.2.2

Устойчивое распознавание противоположных по знаку топологических зарядов вихревых пучков нейронными сетями в турбулентной атмосфере

Е.А. Богач[✉], Е.В. Адамов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Томск*

[✉]bogach@iao.ru

Аннотация. В последние годы активно исследуется задача передачи информации через атмосферно-оптические каналы связи с помощью вихревых лазерных пучков, которые позволяют кодировать информацию в значениях топологического заряда. Серьёзной проблемой в работе подобных систем является атмосферная турбулентность. Лазерные пучки при распространении в турбулентной атмосфере претерпевают случайные фазовые искажения, что приводит к ошибкам декодирования и значительно снижает скорость передачи данных. В решении данной проблемы хорошо зарекомендовали себя нейронные сети. Наиболее распространённый способ заключается в использовании нейронных сетей для распознавания значения топологического заряда вихревого пучка по разрушенным турбулентной атмосферой мгновенным распределениям интенсивности в плоскости регистрации. Такой подход позволяет значительно снизить количество ошибок декодирования, возникающих из-за влияния турбулентности. Ограничением описанного метода считается невозможность различать по мгновенным распределениям интенсивности вихревые пучки с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку топологическими зарядами, поскольку в однородной среде такие пучки формируют тождественные распределения интенсивности и считается, что случайные турбулентные искажения пучка не зависят от знака топологического заряда. На это также указывает тождественность усреднённых по множеству турбулентных реализаций картин распределений интенсивности пучков с топологическими зарядами разных знаков. В данном исследовании на основе численного моделирования впервые показано устойчивое к поворотам и отражениям изображений распознавание топологических зарядов противоположных знаков по мгновенным распределениям интенсивности вихревых пучков в турбулентной атмосфере с помощью нейронных сетей. Обнаруженный эффект открывает новые перспективы для создания атмосферно-оптических систем передачи данных, позволяя использовать для кодирования информации не только величину, но и знак топологического заряда. Результаты исследования также указывают на то, что вносимые турбулентной атмосферой фазовые искажения приводят к возникновению в мгновенных распределениях интенсивности устойчивых к поворотам признаков, зависящих от знака топологического заряда.

Ключевые слова: топологический заряд, орбитальный угловой момент, вихревой пучок, оптический вихрь, турбулентная атмосфера, распределение интенсивности, численное моделирование, нейронная сеть

Для цитирования: Устойчивое распознавание противоположных по знаку топологических зарядов вихревых пучков нейронными сетями в турбулентной атмосфере / Е.А. Богач, Е.В. Адамов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 3. – С. 27–36.
DOI: 10.18799/29495407/2025/3/95

UDC 535

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/95

Robust recognition of opposite-sign vortex beams topological charges in a turbulent atmosphere by neural networks

E.A. Bogach[✉], E.V. Adamov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Tomsk, Russian Federation*

[✉]bogach@iao.ru

Abstract. In recent years, the problem of transmitting information through atmospheric optical communication channels using vortex laser beams to encode information in topological charge values has been actively investigated. Atmospheric turbulence is a significant challenge in the operation of such systems. When propagating in a turbulent atmosphere, laser beams undergo random phase distortions, which leads to decoding errors and significantly reduces the data transfer rate. Neural networks have proved to be effective in solving this problem. The most common method is to use neural networks to recognize the value of the topological charge of a vortex beam from distorted by a turbulent atmosphere instantaneous intensity distributions in the registration plane. This method significantly reduces the number of errors caused by atmospheric turbulence. The considered limitation of the described method is the inability to distinguish between vortex beams with the same absolute value but opposite sign topological charges according to the instantaneous intensity distribution. This is explained by the fact that in a homogeneous medium such beams form identical intensity distribution patterns. It is also assumed that random turbulent distortions do not depend on the sign of the topological charge. This assumption was also confirmed by the observation that the intensity distributions averaged over a large number of various turbulence realizations are identical for beams with beams with opposite signs of topological charges. In this study, the recognition of topological charges with opposite signs from intensity distributions using neural networks shown for the first time based on numerical simulation. This discovery opens up new possibilities for creating atmospheric optical data transmission systems as it allows the use not only the magnitude but also the sign of topological charge to encode information. The results also indicate that phase distortions introduced by turbulent atmosphere lead to rotation-resistant and depending on the sign of topological charge features in instantaneous intensity distributions.

Keywords: topological charge, orbital angular momentum, vortex beam, optical vortex, turbulent atmosphere, intensity distribution, numerical simulation, neural network

For citation: Bogach E.A., Adamov E.V., Dudorov V.V., Kolosov V.V. Robust recognition of opposite-sign vortex beams topological charges in a turbulent atmosphere by neural networks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 3, pp. 27–36. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/95

Введение

Актуальной задачей настоящего времени является создание новых и увеличение пропускной способности уже существующих каналов передачи информации. Активно исследуются возможности построения беспроводных атмосферно-оптических систем связи [1]. Применяются различные подходы к созданию подобных систем [2], которые включают использование поляризации излучения [3] и орбитального углового момента (ОУМ) [4, 5] для мультиплексирования каналов передачи данных [6, 7] и кодирования информации [5, 8, 9], а также исследуются системы не прямой видимости (Non-line-of-sight – NLOS) [10–12].

Поскольку возможности увеличения информационной емкости атмосферно-оптических каналов связи за счёт применения традиционных методов

амплитудной, фазовой и частотной модуляции приближаются к своему пределу, основным направлением дальнейшего увеличения пропускной способности считается использование лазерных пучков, переносящих ОУМ [13, 14]. Такие пучки называются вихревыми пучками или оптическими вихрями. Вихревые пучки характеризуются наличием особого спиралевидного фазового фронта, который можно описать в полярных координатах с помощью фазового множителя $\exp(i\theta l)$, где θ – азимутальный угол полярных координат, l – целое число, называемое топологическим зарядом [15, 16]. В однородной среде величина топологического заряда совпадает с нормированным на мощность значением проекции ОУМ на ось распространения [15, 16]. Модуляция значений l позволяет кодировать информацию.

Турбулентность атмосферы представляет серьезную проблему в задачах передачи информации в атмосферно-оптических каналах связи, в том числе при использовании вихревых пучков. Переносящие информацию лазерные пучки, распространяясь через турбулентную атмосферу, претерпевают случайные фазовые искажения [17, 18], что приводит к ошибкам в декодировании топологического заряда или ОУМ [5, 9, 13, 19–21]. Методы адаптивной оптики могут применяться для снижения влияния турбулентности для вихревых пучков [22, 23], однако данный подход имеет ряд ограничений и требует дорогостоящего оборудования, существенно снижающего экономическую эффективность системы связи. Другим подходом, который активно исследуется в последние годы, является применение нейронных сетей для декодирования топологического заряда вихревых пучков по распределениям интенсивности [5, 24, 25]. Наиболее распространенный способ заключается в определении значения l по искаженному турбулентной атмосферой мгновенному распределению интенсивности, которое регистрируется в приёмной плоскости после распространения [5, 24, 25], что позволяет значительно снизить влияние турбулентных искажений.

Вихревые пучки с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку топологическими зарядами в однородной среде формируют тождественные распределения интенсивности в приёмной плоскости. Считается также, что вносимые турбулентной атмосферой фазовые искажения являются случайными и не зависят от знака топологического заряда вихревого пучка. На это также указывает тождественность усреднённых по большому числу реализаций мгновенных распределений интенсивности вихревых пучков с противоположными по знаку топологическим зарядами. В работе [26] показано, что применение нейронных сетей позволяет различать топологические заряды противоположных знаков по спекл-картинам, полученным в результате рассеяния вихревых пучков диффузором. В работе [27] впервые продемонстрировано, что применение нейронных сетей позволяет различать противоположные по знаку ОУМ по мгновенным картинкам распределений интенсивности в турбулентной атмосфере.

Целью данного исследования является анализ устойчивости нейронных сетей к поворотам и отражениям изображений в задаче распознавания противоположных по знаку топологических зарядов вихревых лазерных пучков в турбулентной атмосфере по мгновенным распределениям интенсивности. Работа выполнена на основе численного моделирования распространения пучков Лагерра-Гаусса (ЛГ-пучков) в турбулентной атмосфере и дальнейшего использования полученных в резуль-

тате расчётов мгновенных распределений интенсивности для обучения и тестирования нейронной сети.

Методы и описание численного эксперимента

Численное решение задачи распространения вихревых лазерных пучков через турбулентную атмосферу реализуется на основе методов расщепления по физическим факторам и методов фазовых экранов [28–30]. Схема численного эксперимента приведена на рис. 1. Поскольку основная цель исследования – это анализ устойчивости к поворотам изображений распознавания топологических зарядов противоположных знаков с помощью нейронных сетей, при моделировании использовались нормированные переменные. Поперечные координаты x, y нормировались на радиус пучка в начальной плоскости ω_0 , а дистанция распространения вихревых пучков задавалась равной длине дифракции $l_D = k\omega_0^2/2$, где $k = 2\pi\lambda$ – волновое число. Размер расчётной сетки составлял 512×512 точек, а размер стороны расчётной сетки – $16\omega_0$.

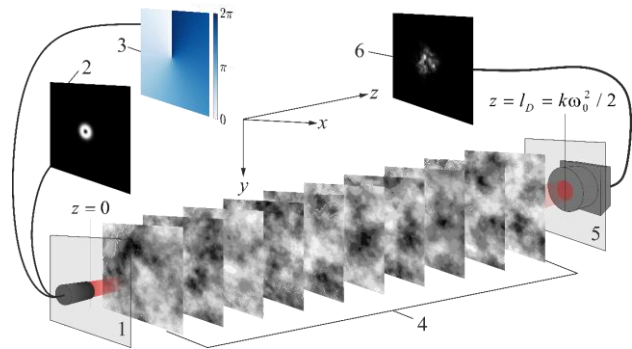


Рис. 1. Схема численного эксперимента: 1 – начальная плоскость ($z=0$); 2 – распределение интенсивности в начальной плоскости при $l=+1$; 3 – распределение фазы в начальной плоскости; 4–10 – случайные фазовые экраны, посредством которых моделируется атмосферная турбулентность; 5 – плоскость регистрации ($z=l_D=k\omega_0^2/2$); 6 – мгновенное распределение интенсивности в плоскости регистрации при $l=+1$

Fig. 1. Numerical experiment scheme: 1 – initial plane ($z=0$); 2 – intensity distribution in the initial plane for $l=+1$; 3 – phase distribution in the initial plane; 4–10 – random phase screens for atmospheric turbulence simulation; 5 – receiving plane ($z=l_D=k\omega_0^2/2$); 6 – instantaneous intensity distribution in the receiving plane at $l=+1$

Комплексная амплитуда поля ЛГ-пучков задавалась в начальной плоскости согласно (1):

$$U_{LG}(r', \theta, l, p, z=0) = 4C_{norm} \left(\sqrt{2}r' \right) L_p^{|l|} (2r'^2) \exp(-r'^2) \exp(il\theta), \quad (1)$$

где r' – нормированный на ω_0 радиус r в полярных координатах ($r^2 = x^2 + y^2$); $C_{norm} = \sqrt{p! / (p + |l|)!}$ – нормировочный множитель; $L_p^{(l)}$ – обобщенный полином Лагерра; θ – азимутальный угол полярных координат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка; l – азимутальный индекс, значение которого тождественно значению топологического заряда и величине нормированной на мощность проекции ОУМ на ось распространения; p – радиальный индекс, определяющий количество дополнительных колец в распределении интенсивности.

Моделирование атмосферной турбулентности осуществлялось посредством 10 случайных фазовых экранов, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга. В расчётах использовался нормированный спектр показателя преломления, соответствующий модели Кармана (2) [31]:

$$\Phi'(\kappa'_\perp) = 2\pi \cdot 2,36 \cdot r_0'^{-5/3} \cdot \frac{0,033 \exp(-\kappa'_\perp{}^2 / \kappa_m'^2)}{(\kappa'_\perp{}^2 + \kappa_0'^2)^{11/6}}, \quad (2)$$

где r_0' – нормированный на ω_0 радиус Фрида $r_0 = \{0,423k^2 C_n^2 L\}^{-3/5}$; C_n^2 – структурная характеристика показателя преломления; L – дистанция распространения излучения; $\kappa_m' = 5.92 / l_0'$, $\kappa_0' = 2\pi / L_0'$, а l_0' и L_0' – нормированные на ω_0 внутренний и внешний масштабы турбулентности соответственно, которые в расчётах принимали значения $l_0' = 0,08$ и $L_0' = 12$.

Известно, что при обходе по замкнутому контуру вокруг оси вихревого пучка наблюдается набег фазы, равный произведению 2π и целого числа l , называемого топологическим зарядом [15, 16]. Топологический заряд может быть определён из фазы оптического поля $\varphi(\mathbf{r}, z)$ согласно выражению (3) [16]:

$$l = \frac{1}{2\pi} \oint_C \nabla_\perp \varphi(\mathbf{r}, z) d\mathbf{r}, \quad (3)$$

где C – контур интегрирования; $d\mathbf{r}$ – бесконечно малый вектор, направленный вдоль касательной к контуру C ; $\nabla_\perp$ – градиент в поперечных координатах.

В данном исследовании использовались ЛГ-пучки с радиальным индексом $p=0$ и с топологическими зарядами $l=\pm 1$, распространяющимися в турбулентной атмосфере с $r_0=\omega_0$. В однородной среде такие пучки имеют тождественные распределения интенсивности кольцеобразного вида (рис. 2, а).

В турбулентной атмосфере пучки искажаются случайным образом (рис. 2, б), однако усредненные по набору случайных реализаций турбулентной среды распределения интенсивности для $l=\pm 1$, как и в однородной среде, являются тождественными (рис. 2, в). При этом, несмотря на то, что мгновенные распределения интенсивности для $l=\pm 1$ могут значительно отличаться друг от друга, это не позволяет явно определить, к какому знаку топологического заряда относится определенное распределение интенсивности.

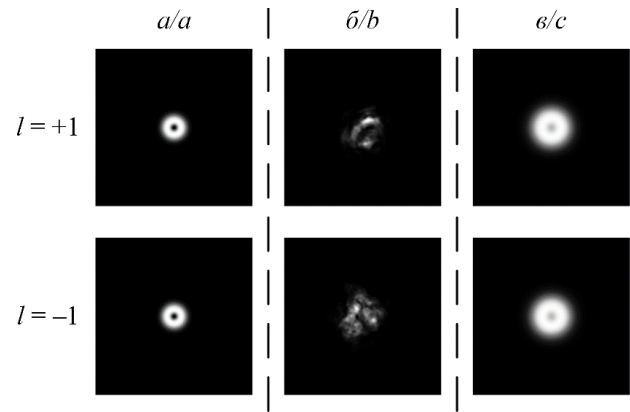


Рис. 2. Примеры изображений распределений интенсивности: а) распределения интенсивности в начальной плоскости; б) мгновенные распределения интенсивности в плоскости регистрации; в) усредненные по 30000 реализациям распределения интенсивности в плоскости регистрации

Fig. 2. Examples of intensity distribution images: а) intensity distributions in the initial plane; б) instantaneous intensity distribution in the receiving plane; в) averaged over 30000 realizations intensity distribution in the receiving plane

В рамках исследования выполнено 100000 расчётов мгновенных распределений интенсивности в плоскости регистрации, по 50000 для каждого из используемых значений топологического заряда l . Полученный в результате расчётов набор изображений распределений интенсивности был затем разделён на тренировочную, валидационную и тестовую выборки, в каждой из которых количество изображений для каждого l было одинаковым. Тренировочная выборка состояла из 60 % всего набора изображений, а валидационная и тестовая – по 20 % каждая.

В исследовании использовалась свёрточная нейронная сеть, архитектура которой разработана согласно зарекомендовавшим себя в подобных задачах подходам [32, 33]. Архитектура используемой нейронной сети и её свёрточных блоков представлена на рис. 3. Предварительный слой свёртки с фильтрами размером 7×7 и шагом 2 (Conv2D) с

функцией активации (LeakyReLU), а также свёрточные блоки, каждый из которых состоит из последовательно применяемых слоев свёртки, функции активации и субдискретизации (MaxPooling), извлекают сложные признаки из изображений интенсивности [32, 33]. Полносвязные слои (Dense) формируют из извлеченных признаков вероятность соответствия исследуемого изображения каждому из используемых значений l . Полученные вероятности затем преобразуются в значение топологического заряда, распознанного нейронной сетью.

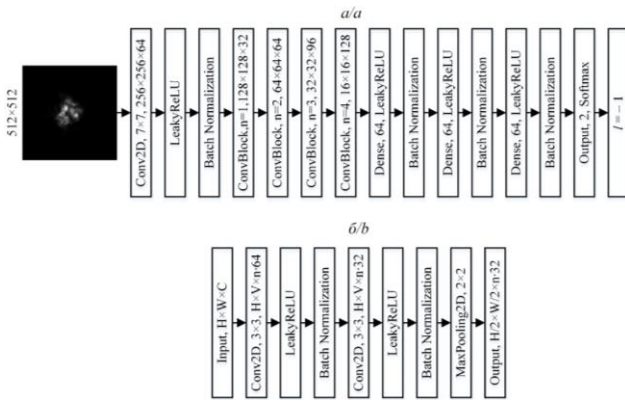


Рис. 3. Архитектура свёрточной нейронной сети (а) и свёрточных блоков (б)

Fig. 3. Architecture of convolution neural network (a) and convolutional blocks (b)

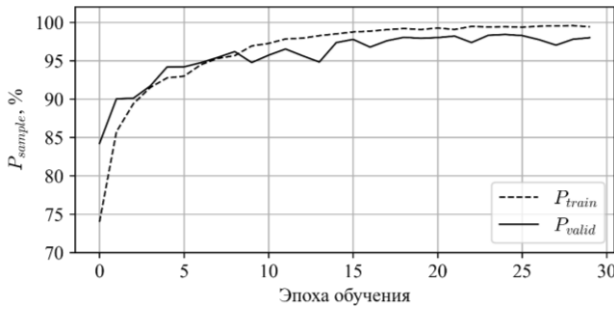


Рис. 4. Точность распознавания топологического заряда на тренировочной P_{train} и на валидационной P_{valid} выборках в зависимости от порядкового номера эпохи обучения

Fig. 4. Topological charge recognition accuracy for train P_{train} and validation P_{valid} samples as function of epoch order number

В процессе обучения для оценки работоспособности модели использовалась точность распознавания топологического заряда на выборке P_{sample} , которая определялась согласно (4):

$$P_{\text{sample}} = \frac{N_{\text{sample}}^{\text{True}}}{N_{\text{sample}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $N_{\text{sample}}^{\text{True}}$ – количество верно определенных топологических зарядов во всей выборке (для всех значений l); N_{sample} – количество всех изображений в выборке.

Обучение свёрточной нейронной сети производилось в течение 30 эпох. При обучении тренировочная выборка использовалась для обновления весов нейронной сети, а валидационная – для контроля за переобучением модели. На рис. 4 приведены зависимости точности на тренировочной и тестовой выборках от порядкового номера эпохи обучения.

Результаты и обсуждение

Обученная нейронная сеть была применена для распознавания топологического заряда по исходным, повернутым на 90° , 180° и 270° вокруг центра и отражённым по вертикали и по горизонтали изображениям тестовой выборки. Выбор углов поворота изображений обусловлен тем, что поворот изображений на такие углы не требует интерполяции и, соответственно, не приводит к искажениям изображения.

Исследование устойчивости распознавания топологических зарядов противоположных знаков с помощью нейронных сетей к поворотам и отражениям изображений необходимо для исключения влияния численных эффектов, возникающих при моделировании распространения лазерных пучков через атмосферу. Повороты изображений вокруг центра не изменяют знака топологического заряда, поскольку такой случай соответствует повороту задаваемой в начальной плоскости фазы оптического поля на тот же угол (рис. 5, а, б), что, очевидно, не приводит к изменению направления возрастания фазового набега при обходе по замкнутому контуру. Отражение пучка по вертикали или горизонтали изменяет знак топологического заряда на противоположный, поскольку данный случай соответствует отражению по вертикали или горизонтали фазы в начальной плоскости (рис. 5, а, в), в результате чего изменяется направление возрастания фазового набега. Таким образом, если при поворотах или отражениях изображений количество верно определённых значений топологического заряда значительно изменится, то возможной причиной определения знака будет являться численный эффект.

Результаты применения нейронной сети для распознавания топологического заряда по исходным и преобразованным изображениям тестовой выборки приведены в виде матриц ошибок (confusion matrix) на рис. 6.

Обученная свёрточная нейронная сеть верно распознала топологический заряд более чем 97 % случаев как по исходным изображениям тестовой

выборки, так и при поворотах и отражениях этих изображений.

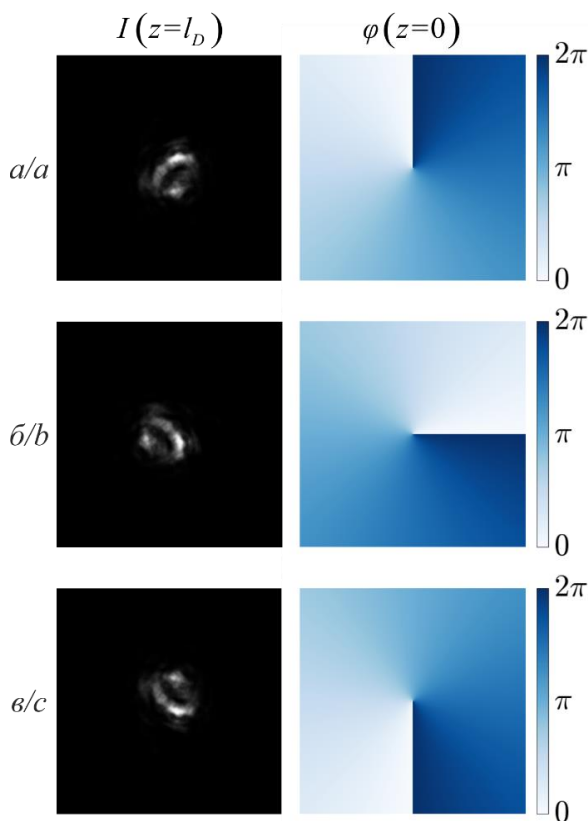


Рис. 5. Мгновенное распределение интенсивности в плоскости регистрации и соответствующее распределение фазы оптического поля в начальной плоскости в исходном виде (а), после поворота на 90° вокруг центра (б) и после отражения по горизонтали (в)

Fig. 5. Instantaneous intensity distribution in the receiving plane and corresponding phase distribution in the initial plane in the original form (a), after rotation by 90° around the center (b) and after horizontal reflection (c)

Полученный результат доказывает, что численные эффекты моделирования не являются причиной, по которой нейронная сеть различает противоположные по знаку топологические заряды в результате анализа мгновенных распределений интенсивности, поскольку в ином случае повороты и отражения изображений привели бы к значительным изменениям в количестве верно распознанных значений. Несмотря на то, что усредненные по турбулентности распределения интенсивности вихре-

вых пучков, как и в однородной среде, тождественны, случайно искаженные мгновенные распределения интенсивности вихревых пучков с противоположными топологическими зарядами характеризуются некоторым отличительным признаком, который обнаруживает нейронная сеть. Полученные результаты также указывают на то, что данный признак устойчив к поворотам изображений и характеризует знак топологического заряда даже в случае отражения изображений.

		a/a		b/b		c/c			
Истинные значения	-1	TRUE -1 9764 97.64%	FALSE +1 236 2.36%	-1	TRUE -1 9775 97.75%	FALSE +1 225 2.25%	-1	TRUE -1 9755 97.55%	FALSE +1 245 2.45%
	+1	FALSE -1 218 2.18%	TRUE +1 9782 97.82%	+1	FALSE -1 247 2.47%	TRUE +1 9753 97.53%	+1	FALSE -1 250 2.50%	TRUE +1 9750 97.50%
		d/d		e/e		f/f			
Истинные значения	-1	TRUE -1 9783 97.83%	FALSE +1 217 2.17%	-1	TRUE -1 9798 97.98%	FALSE +1 202 2.02%	-1	TRUE -1 9779 97.79%	FALSE +1 221 2.21%
	+1	FALSE -1 250 2.50%	TRUE +1 9750 97.50%	+1	FALSE -1 237 2.37%	TRUE +1 9763 97.63%	+1	FALSE -1 214 2.14%	TRUE +1 9786 97.86%
		Распознанные значения		Распознанные значения		Распознанные значения			

Рис. 6. Матрицы ошибок, полученные в результате применения нейронной сети для распознавания топологических зарядов противоположных знаков по изображениям тестовой выборки в исходном виде (а), отражённым по вертикали (б) и по горизонтали (в), а также повернутым вокруг центра на 90° , 180° и 270° (г-е)

Fig. 6. Confusion matrix obtained after using neural network to recognize opposite-sign topological charges from original test sample images (a) and from reflected vertically (b) and horizontally (c) as well as rotated around the center by 90° , 180° and 270° test sample images (d-f)

Закключение

В исследовании показано, что с помощью нейронных сетей можно распознавать топологические заряды противоположных знаков по мгновенным распределениям интенсивности вихревых пучков в турбулентной атмосфере с высокой точностью, которая сохраняется даже в случае поворота и отражения пучка. Полученные результаты указывают на то, что вносимые турбулентной атмосферой фазовые искажения могут зависеть от направления «закрутки» вихревых пучков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roadmap of optical communications / E. Agrell, M. Karlsson, A.R. Chraplyvy, D.J. Richardson, P.M. Krummrich, P. Winzer, K. Roberts, J.K. Fischer, S.J. Savory, B.J. Eggleton, M. Secondini, F.R. Kschischang, A. Lord, J. Prat, I. Tomkos, J.E. Bowers, S. Srinivasan, M. Brandt-Pearce, N. Gisin // Journal of Optics – 2016. – Vol. 18. – № 6. – article number 063002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/6/063002>

2. Evolution of short-range optical wireless communications / K. Wang, T. Song, Y. Wang, C. Fang, J. He, A. Nirmalathas, C. Lim, E. Wong, S. Kandeepan // *Journal of Lightwave Technology*. – 2023. – Vol. 41. – № 4. – P. 1019–1040. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2022.3215590>
3. Controlling the polarization structure of vector beams synthesized by a fiber laser array / E.V. Adamov, E.A. Bogach, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitskii // *Optics Communications*. – 2024. – Vol. 559. – Article number 130399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130399>
4. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45. – № 11. – P. 8185–8189. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
5. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna / M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger // *New Journal of Physics*. – 2014. – Vol. 16. – Article number 113028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
6. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength / H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M.J. Willner, B.I. Erkmen, K.M. Birnbaum, S.J. Dolinar, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, M. Tur, A.E. Willner // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39. – Iss. 2. – P. 197–200. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.39.000197>
7. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.Y. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A.E. Willner // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – P. 488–496. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
8. Optical communication in a turbulent atmosphere via the orbital angular momentum of a laser beam. I. Mode purity of OAM transmission / V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, Ch.E. Pogutsa // *Applied Optics*. – 2024. – Vol. 63. – Iss. 28. – P. 7475–7484. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.530512>
9. Оценка возможности передачи информации с использованием оптических вихрей при наличии фона, сформированного массивом случайно расположенных дислокаций / Ф.Ю. Канев, В.П. Аксенов, Н.А. Макенова, И.Д. Веретехин // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34. – № 9. – С. 716–725. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20210908>
10. Tarasenkova M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V. Non-line-of-sight atmospheric optical communication in the visible wavelength range between UAV and the ground surface // *Atmosphere*. – 2024. – Vol. 15. – Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15010021>
11. Оптическая загоризонтная связь. Полевые, лабораторные и численные эксперименты в России в 2012–2022 гг. / В.В. Белов, М.В. Тарасенков, Е.С. Познахареv, А.В. Федосов, В.Н. Абрамочкин // *Оптика атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 36. – № 10. – С. 787–798. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20231001>
12. Non-line-of-sight optical communication based on orbital angular momentum / Z. Liu, Y. Huang, H. Liu, X. Chen // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46. – Iss. 20. – P. 5112–5115. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.441441>
13. Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M.P.J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A.F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 66–106. DOI: <https://doi.org/10.1364/AOP.7.000066>
14. Wang J. Advances in communications using optical vortices // *Photonics Research*. – 2016. – Vol. 4. – Iss. 5. – P. B14–B28. DOI: <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000B14>
15. Ковалёв А.А., Котляр В.В., Калинин Д.С. Орбитальный угловой момент и топологический заряд Гауссова пучка с несколькими оптическими вихрями // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44. – № 1. – С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-632>
16. Vortex beams with zero orbital angular momentum and non-zero topological charge / V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, G.A. Filimonov, V.V. Kolosov, V.Yu. Venediktov // *Optics & Laser Technology*. – 2018. – Vol. 104. – P. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.022>
17. Probability distribution of intensity fluctuations of arbitrary-type laser beams in the turbulent atmosphere / V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, V.Yu. Venediktov // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27. – Iss. 17. – P. 24705–24716. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.27.024705>
18. Доказательство гипотезы Хопфа о структуре турбулентности (памяти Татарского) / В.В. Носов, В.П. Лукин, П.Г. Ковадло, Е.В. Носов, А.В. Торгаев // *Оптика атмосферы и океана*. – 2023. – Т. 36. – № 1. – С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20230102>
19. Optical vortex detector as a basis for a data transfer system: operational principle, model, and simulation of the influence of turbulence and noise / V.P. Aksenov, F.Y. Kanev, I.V. Izmailov, B.N. Poizner // *Optics Communications*. – 2012. – Vol. 285. – № 6. – P. 905–928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.10.060>
20. Канев Ф.Ю., Аксенов В.П., Веретехин И.Д. Анализ точности алгоритмов регистрации оптических вихрей // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34. – № 1. – С. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20210101>
21. Free-space optical communication link with shape-invariant orbital angular momentum Bessel beams / N. Mphuthi, L. Gaille, I. Litvin, A. Dudley, R. Botha, A. Forbes // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58. – Iss. 16. – P. 4258–4264. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.58.004258>
22. Лукин В.П., Лукин И.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // *Компьютерная оптика*. – 2024. – Т. 48. – № 1. – С. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1355>
23. Коняев П.А., Лукин В.П. Адаптивная фазовая коррекция вихревых лазерных пучков в турбулентной атмосфере // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52. – № 12. – С. 1146–1151.
24. Top three intelligent algorithms for OAM mode recognitions in optical communications / B. Wang, X. Zhang, S.A.A. Shah, B. Merabet, A.A. Kovalev, S.S. Stafeev, E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar, Z. Guo // *Engineering Research Express*. – 2024. – Vol. 6. – Article number 032202. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad61bc>

25. Machine learning based accurate recognition of fractional optical vortex modes in atmospheric environment / M. Cao, Y. Yin, J. Zhou, J. Tang, L. Cao, Y. Xia, J. Yin // *Applied Physics Letters*. – 2021. – Vol. 119. – Iss. 14. – Article number 141103. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0061365>
26. How convolutional-neural-network detects optical vortex scattering fields / J. Hu, Z. Guo, Y. Fu, J.A. Gan, P.F. Chen, G. Chen, C. Min, X. Yuan, F. Feng // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2023. – Vol. 160. – Article number 107246. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107246>
27. Распознавание противоположных по знаку орбитальных угловых моментов вихревых пучков в турбулентной атмосфере с помощью нейронных сетей / Е.А. Богач, Е.В. Адамов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2025. – Т. 38. – № 4. – С. 247–254. DOI: <https://doi.org/10.15372/AOO20250401>
28. Fleck J.A., Morris J.R., Feit M.D. Time-dependent propagation of high-energy laser beams through the atmosphere // *Applied Physics*. – 1976. – Vol. 10. – P. 129–160. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00896333>
29. Konyaev P.A., Lukin V.P. Thermal distortions of focused laser beams in the atmosphere // *Applied Optics*. – 1985. – Vol. 24. – Iss. 3. – P. 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.24.000415>
30. Коняев П.А., Тартаковский Е.А., Филимонов Г.А. Численное моделирование распространения оптических волн с использованием технологий параллельного программирования // *Оптика атмосферы и океана*. – 2011. – Т. 24. – № 5. – С. 359–365.
31. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media. – Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005. – 782 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.626196>
32. A review of convolutional neural networks in computer vision / X. Zhao, L. Wang, Y. Zhang, X. Han, M. Deveci, M. Parmar // *Artificial Intelligence Review*. – 2024. – Vol. 57. – Article number 99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>
33. Николенко С., Кадушин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.

Информация об авторах

Егор Андреевич Богач, младший научный сотрудник лаборатории оптической локации, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; bogach@iao.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3877-9522>

Егор Владимирович Адамов, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптической локации, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; adamov@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3335-7634>

Вадим Витальевич Дудоров, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; dvv@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9660-5199>

Валерий Викторович Колосов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией оптической локации, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; kvv@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9709-8627>

Поступила: 20.07.2025

Принята: 10.09.2025

Опубликована: 27.09.2025

REFERENCES

1. Agrell E., Karlsson M., Chraplyvy A.R., Richardson D.J., Krummrich P.M., Winzer P., Roberts K., Fischer J.K., Savory S.J., Eggleton B.J., Secondini M., Kschischang F.R., Lord A., Prat J., Tomkos I., Bowers J.E., Srinivasan S., Brandt-Pearce M., Gisin N. Roadmap of optical communications. *Journal of Optics*, 2016, vol. 18, no. 6, article number 063002. DOI: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/6/063002>
2. Wang K., Song T., Wang Y., Fang C., He J., Nirmalathas A., Lim C., Wong E., Kandeepan S. Evolution of short-range optical wireless communications. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, no. 4, pp. 1019–1040. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2022.3215590>
3. Adamov E.V., Bogach E.A., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Levitskii M.E. Controlling the polarization structure of vector beams synthesized by a fiber laser array. *Optics Communications*, 2024, vol. 559, article number 130399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130399>
4. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes. *Physical Review A*, 1992, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
5. Krenn M., Fickler R., Fink M., Handsteiner J., Malik M., Scheidl T., Ursin R., Zeilinger A. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna. *New Journal of Physics*, 2014, vol. 16, article number 113028, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
6. Huang H., Xie G., Yan Y., Ahmed N., Ren Y., Yue Y., Rogawski D., Willner M.J., Erkmen B.I., Birnbaum K.M., Dolinar S.J., Lavery M.P.J., Padgett M.J., Tur M., Willner A.E. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, Iss. 2, pp. 197–200. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.39.000197>

7. Wang J., Yang J.Y., Fazal I.M., Ahmed N., Yan Y., Huang H., Ren Y., Yue Y., Dolinar S., Tur M., Willner A.E. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*, 2012, vol. 6, pp. 488–496. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
8. Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Pogutsa Ch.E. Optical communication in a turbulent atmosphere via the orbital angular momentum of a laser beam. I. Mode purity of OAM transmission. *Applied Optics*, 2024, vol. 63, Iss. 28, pp. 7475–7484. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.530512>
9. Kanev F.Y., Aksenov V.P., Makenova N.A., Veretekhin I.D. Estimation of the possibility of information transfer using optical vortices in the presence of a background formed by an array of randomly located dislocations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 202–211. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856022030046>
10. Tarasenkova M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V. Non-line-of-sight atmospheric optical communication in the visible wavelength range between UAV and the ground surface. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15010021>
11. Belov V.V., Tarasenkova M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V., Abramochkin V.N. Non-line-of-sight optical communication: field, laboratory, and numerical experiments in Russia in 2012–2022. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, vol. 36 (Suppl. 1), pp. S1–S12. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856024010044>
12. Liu Z., Huang Y., Liu H., Chen X. Non-line-of-sight optical communication based on orbital angular momentum. *Optics Letters*, 2021, vol. 46, Iss. 20, pp. 5112–5115. DOI: <https://doi.org/10.1364/ol.441441>
13. Willner A.E., Huang H., Yan Y., Ren Y., Ahmed N., Xie G., Bao C., Li L., Cao Y., Zhao Z., Wang J., Lavery M.P.J., Tur M., Ramachandran S., Molisch A.F., Ashrafi N., Ashrafi S. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, vol. 7, Iss. 1, pp. 66–106. DOI: <https://doi.org/10.1364/AOP.7.000066>
14. Wang J. Advances in communications using optical vortices. *Photonics Research*, 2016, vol. 4, Iss. 5, pp. B14–B28. DOI: <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000B14>
15. Kovalev A.A., Kotlyar V.V., Kalinkina D.S. Orbital angular momentum and topological charge of a Gaussian beam with multiple optical vortices. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-632>
16. Aksenov V.P., Dudorov V.V., Filimonov G.A., Kolosov V.V., Venediktov V.Yu. Vortex beams with zero orbital angular momentum and non-zero topological charge. *Optics & Laser Technology*, 2018, vol. 104, pp. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.022>
17. Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., Venediktov V.Yu. Probability distribution of intensity fluctuations of arbitrary-type laser beams in the turbulent atmosphere. *Optics Express*, 2019, vol. 27, Iss. 17, pp. 24705–24716. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.27.024705>
18. Nosov V.V., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Nosov E.V., Torgaev A.V. Proof of Hopf’s conjecture on the structure of turbulence (in memory of Tatarsky). *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 300–305. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856023040139>
19. Aksenov V.P., Kanev F.Y., Izmailov I.V., Poizner B.N. Optical vortex detector as a basis for a data transfer system: Operational principle, model, and simulation of the influence of turbulence and noise. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, no. 6, pp. 905–928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.10.060>
20. Kanev F.Y., Aksenov V.P., Veretekhin I.D. Analysis of accuracy of optical vortex detection algorithms. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, vol. 34, no. 3, pp. 161–173. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856021030088>
21. Mphuthi N., Gailele L., Litvin I., Dudley A., Botha R., Forbes A. Free-space optical communication link with shape-invariant orbital angular momentum Bessel beams. *Applied Optics*, 2019, vol. 58, Iss. 16, pp. 4258–4264. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.58.004258>
22. Lukin V.P., Lukin I.P. Overview of modern technologies for measuring, predicting and correcting turbulent distortions in optical waves. *Computer Optics*, 2024, vol. 48, no. 1, pp. 68–80. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1355>
23. Konyaev P.A., Lukin V.P. Adaptive phase correction of vortex laser beams in turbulent atmosphere. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, vol. 50, pp. S486–S493. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335623160066>
24. Wang B., Zhang X., Shah S.A.A., Merabet B., Kovalev A.A., Stafeyev S.S., Kozlova E.S., Kotlyar V.V., Guo Z. Top three intelligent algorithms for OAM mode recognitions in optical communications. *Engineering Research Express*, 2024, vol. 6, article number 032202. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad61bc>
25. Cao M., Yin Y., Zhou J., Tang J., Cao L., Xia Y., Yin J. Machine learning based accurate recognition of fractional optical vortex modes in atmospheric environment. *Applied Physics Letters*, 2021, vol. 119, Iss. 14, article number 141103. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0061365>
26. Hu J., Guo Z., Fu Y., Gan J.A., Chen P.F., Chen G., Min C., Yuan X., Feng F. How convolutional-neural-network detects optical vortex scattering fields. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, vol. 160, article number 107246. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107246>
27. Bogach E.A., Adamov E.V., Dudorov V.V., Kolosov V.V. Recognition of opposite-in-sign orbital angular momenta of laser beams in a turbulent atmosphere with neural networks. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2025, vol. 38, no. 4, pp. 386–393. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856025700216>
28. Fleck J.A., Morris J.R., Feit M.D. Time-dependent propagation of high-energy laser beams through the atmosphere. *Applied Physics*, 1976, vol. 10, pp. 129–160. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00896333>
29. Konyaev P.A., Lukin V.P. Thermal distortions of focused laser beams in the atmosphere. *Applied Optics*, 1985, vol. 24, Iss. 3, pp. 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.24.000415>
30. Konyaev P.A., Tartakovskii E.A., Filimonov G.A. Computer simulation of optical wave propagation with the use of parallel programming. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 425–431. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856011050095>
31. Andrews L.C., Phillips R.L. *Laser beam propagation through random media*. Bellingham, SPIE Optical Engineering Press, 2005. 782 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.626196>

32. Zhao X., Wang L., Zhang Y., Han X., Deveci M., Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 2024, vol. 57, Article number 99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>
33. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep learning*. St Petersburg, Piter Publ., 2018. 480 p. (In Russ.)

Information about the authors

Egor A. Bogach, Junior Staff Scientist, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation; bogach@iao.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3877-9522>

Egor V. Adamov, Cand. Sc., Staff Scientist, Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation; adamov@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3335-7634>

Vadim V. Dudorov, Dr. Sc., Deputy Director, Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation; dvv@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9660-5199>

Valerii V. Kolosov, Dr. Sc., Head of Laboratory of Optical Location, Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation; kvv@iao.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9709-8627>

Received: 20.07.2025

Revised: 10.09.2025

Accepted: 27.09.2025