Введение

Сжатие данных является одной из актуальных проблем в области современных информационных технологий. Производительность вычислительной техники постоянно растет, и несмотря на повышение емкости и доступности носителей информации, а также пропускной способности телекоммуникационных линий, их возможности не успевают за ростом потоков данных, требующих обработки. При этом особую значимость приобретает проблема сжатия цифровых изображений, представляющих собой один из наиболее распространенных в настоящее время типов данных.

Сжатие цифровых изображений основывается на устранении присущей им пространственной избыточности, проявляющейся в виде близости друг другу значений соседних пикселей на локальных участках изображения.

Существуют различные подходы к декорреляции элементов цифрового изображения, обладающие своими достоинствами и недостатками. Так, например, декорреляция с предсказанием значений пикселей широко используется в методах сжатия без потерь информации, применение которых актуально для отдельных специализированных приложений, но в общем случае малоэффективно [16, 65]. В свою очередь, фрактальное сжатие изображений, основанное на поиске самоподобных участков, позволяет достичь самых высоких степеней сжатия, но требует чрезмерных вычислительных затрат [12].

В основе наиболее распространенных современных методов сжатия цифровых изображений с потерями лежат ортогональные декорелирующие преобразования, осуществляющие разделение элементов данных на составляющие, содержащие основную информацию об изображении и определяющие малозначимые детали. Сжатие происходит за счет удаления составляющих второго типа из преобразованных элементов данных с последующим энтропийным кодированием оставшихся элементов [10, 65, 81, 84, 100].

К самым известным ортогональным преобразованиям, которые используются в методах сжатия цифровых изображений, относятся преобразование Карунена–Лоэва [82, 95], преобразование Уолша–Адамара [31, 69, 75, 77], дискретное косинусное преобразование [65,

84], являющееся частным случаем дискретного преобразования Фурье, семейство дискретных вейвлетных преобразований [13, 18, 32, 46]. На основе отдельных представителей данного класса преобразований построены такие известные методы сжатия, как JPEG, JPEG 2000, SPIHT, QTCQ, EZW, ICER, JPEG XR, WebP.

Фундаментальные основы обработки и сжатия цифровых изображений были заложены в работах N. Ahmed, K.R. Rao, I. Daubechies, R.C. Gonzalez, M.W. Marcellin. В России наибольший вклад в данную область внесли Д.С. Ватолин, И.И. Исмагилов, Н.Н. Пономаренко, С.В. Умняшкин [9, 12, 14, 16, 18, 33–35, 53, 54, 70–73, 99].

Основная проблема, связанная со сжатием цифровых изображений с потерями, заключается в появлении на восстанавливаемых после сжатия изображениях разного рода искажений — так называемых артефактов сжатия [67]. При этом каждому из известных методов сжатия присущи свои собственные артефакты, характер которых зависит от используемого математического аппарата.

Поэтому актуальными являются исследования, направленные как на улучшение существующих методов сжатия цифровых изображений, так и на разработку новых с привлечением не использовавшегося ранее в данной области математического аппарата.

В настоящее время известны работы, в которых для решения задачи сжатия цифровых изображений был задействован математический аппарат нейронных сетей [40, 66], модифицированное дискретное косинусное преобразование [53, 73], иерархическая сеточная интерполяция [14].

Большой интерес в этом отношении представляет математический аппарат теории клеточных автоматов. Создателями данной теории были J. von Neumann и K. Zuse. На ее дальнейшее развитие значительное влияние оказали работы E.F. Codd, A. Ilachinski, T. Toffoli, J.L. Schiff, S. Wolfram, а также В.З. Аладьева, В.Б. Кудрявцева, А.С. Подколзина [2, 38, 39, 68, 86, 88, 91, 105]. В частности, N. Margolus ввел такое расширение классической модели клеточных автоматов, как блочные клеточные автоматы (клеточные автоматы на разбиении) [68].

Математический аппарат теории клеточных автоматов ранее использовался для сжатия цифровых изображений, однако его использование ограничивалось решением некоторых частных задач в рамках существующих методов. C. Shaw, S. Das и B.K. Sikdar предложили основанный на клеточных автоматах способ энтропийного кодирования элементов цифрового изображения после дискретного вейвлетного преобразования [102]. O. Lafe разработал метод сжатия, построенный на основе декоррелирующего преобразования, использующего в качестве базисных векторов состояния развития класси-

ческого клеточного автомата первого порядка с окрестностью Мура–фон Неймана [98]. Здесь под порядком клеточного автомата подразумевается значение $\lceil \log_2 |\mathbf{A}| \rceil$, где $\mathbf{A}$ — алфавит внутренних состояний, определяющий множество возможных значений каждой из клеток решетки автомата. Недостатком клеточных автоматов первого порядка в контексте решаемой задачи является получение малого количества декоррелирующих преобразований, которые не отличаются разнообразием свойств и, кроме того, являясь частным случаем преобразования Уолша–Адамара, не обладают какими-либо дополнительными свойствами, отсутствующими у известных преобразований.

Поэтому авторами предлагается расширить класс декоррелирующих преобразований, получаемых с помощью динамики клеточного автомата, за счет использования клеточных автоматов более, чем первого порядка, что открывает перспективы построения аппроксимаций более сложных преобразований.