

Методы и модели идентификации протяженных информационных объектов с использованием клеточных автоматов

С. О. Крамаров^{1*}, В. В. Храмов², О. Ю. Митясова³, А. А. Бочаров², Е. В. Гребенюк³

¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва, Российская Федерация

119454, Российская Федерация, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78

* maooovo@yandex.ru

² ЧОУ ВО «Южный университет (ИУБиП)», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
344068, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Михаила Нагибина, д. 33А/47

³ БУ ВО «Сургутский государственный университет», г. Сургут, Российская Федерация
628412, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1

Аннотация

В статье исследовано применение подхода с использованием решетчатых моделей и теории клеточных автоматов при идентификации протяженных объектов на изображениях, получаемых в ходе мониторинга урбанизированных территорий. Такие изображения обладают определенной степенью «размытости», вызванной не только ограничениями самих снимков, но и неполнотой принятой модели объекта, алгоритмов обработки, термодинамическими и квантовыми эффектами. Для созданной методики и ее программной реализации было проведено исследование с целью оценки оперативности получения результатов и качества работы. В качестве критериев оценки выбраны параметры алгоритмов сегментации и идентификации объектов земной поверхности. Как вариант клеточного автомата в работе рассмотрено ранее разработанное устройство фильтрации бинарного изображения. Целью разработки устройства подобного устройства фильтрации является повышение быстродействия за счет распараллеливания выполняемых процедур, характерного для клеточного автомата, имеющего параллельную (не «фоннеймановскую») архитектуру. Представлена схема элемента матрицы памяти рассматриваемого устройства. Показано, что набор признаков идентификации может быть расширен за счет применения элементов триангуляции. Внедрение элементов триангуляции и добавление в процессе построения триангуляционной сетки дополнительных опорных точек могут быть использованы в процессе мониторинга для обозначения потенциально уязвимых объектов. Кроме того, предлагаемая методика позволяет извлекать новую информацию из изображений о таких объектах. Пример подобной информации также представлен в статье. Полученные результаты позволяют с оптимизмом воспринимать ведущиеся разработки и рекомендовать использование разработанной методики при оперативной идентификации протяженных объектов при дистанционном зондировании Земли.

Ключевые слова: информационное пространство, математическая модель клеточного автомата, идентификация объектов, коды Фримена

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Методы и модели идентификации протяженных информационных объектов с использованием клеточных автоматов / С. О. Крамаров, В. В. Храмов, О. Ю. Митясова, А. А. Бочаров, Е. В. Гребенюк. – DOI 10.25559/SITITO.17.202103.564-573 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 564-573.

© Крамаров С. О., Храмов В. В., Митясова О. Ю., Бочаров А. А., Гребенюк Е. В., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Methods and Models for Identification of Extended Information Objects Using Cellular Automata

S. O. Kramarov^{a*}, V. V. Khramov^b, O. Yu. Mityasova^c, A. A. Bocharov^b, E. V. Grebeniuk^c

^a MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation

* maoovo@yandex.ru

^b Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation

33A/47 M. Nagibin Ave., Rostov-on-Don 344068, Russian Federation

^c Surgut State University, Surgut, Russian Federation

1 Lenin Ave., Surgut 628412, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra, Russian Federation

Abstract

The article explores the application of the approach using lattice models and the theory of cellular automata in identifying extended objects in images obtained during monitoring of urbanized areas. Such images have a certain degree of “blurriness” caused not only by the limitations of the images themselves, but also by the incompleteness of the accepted object model, processing algorithms, thermodynamic and quantum effects. For the created methodology and its software implementation, a study was carried out in order to assess the efficiency of obtaining results and the quality of work. Parameters of algorithms for segmentation and identification of objects on the earth’s surface were selected as evaluation criteria. A previously developed binary image filtering device is considered as a variant of a cellular automaton. The purpose of developing a device of such a filtration device is to increase the speed by parallelizing the procedures performed, which is characteristic of a cellular automaton having a parallel (not “von Neumann”) architecture. A scheme of the memory matrix element of the device in question is presented. It is shown that the set of identification features can be expanded due to the elements of triangulation using. The injection of triangulation elements and supplementation of additional reference points during the construction of the triangulation grid can be used in the monitoring process to identify potentially vulnerable objects. In addition, the proposed technique allows extracting new information from images about such objects. An example of such information is also presented in the article. The results obtained make it possible to perceive with optimism the ongoing developments and to recommend the use of the developed technique for the operational identification of extended objects during remote sensing of the Earth.

Keywords: information space, mathematical model of a cellular automaton, object identification, Freeman codes

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kramarov S.O., Khramov V.V., Mityasova O.Yu., Bocharov A.A., Grebeniuk E.V. Methods and Models for Identification of Extended Information Objects Using Cellular Automata. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(3):564-573. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.564-573>



Введение

В настоящее время широкое развитие получили автоматизированные системы, позволяющие формировать проблемно-ориентированные слои единого геоинформационного пространства (ЕГИП). «Применение таких систем позволяет принимать точные и обоснованные решения при проектировании и эксплуатации различных объектов инфраструктуры на транспорте», в промышленности [1], [2], в лесном и сельском хозяйстве [3], при использовании сил и средств МЧС [4], в военном деле и т.п. [5], [6].

Существующие методы, модели и известные программные решения лишь частично снимают проблему, позволяя идентифицировать лишь двумерные элементы изображений, обладающие достаточно высокой четкостью, как правило с помощью операций на основе пороговых подходов и кластеризации [2]. Иначе говоря, не всегда учитываются контекстная информация и, имеющиеся в распоряжении исследователя, данные о связности пространственных элементов и функциональных компонентов как внутри самого исследуемого объекта, так и его с окружающей средой.

Данное исследование посвящено изучению вопросов, связанных с необходимостью и возможностями использования элементов теории клеточных автоматов в процессе создания единого геоинформационного пространства.

Методы и модели

Наличие НЕ-факторов

Реальные изображения в конкретной сцене системы технического зрения (СТЗ) обладают той или иной степенью размытости, которая может быть вызвана не только ограниченной четкостью (точностью получения) самих снимков, но и присутствием других НЕ-факторов [7]: неполнотой и недоопределенностью принятой модели объекта, алгоритмов обработки, термодинамическими и квантовыми эффектами и так далее.

Доступные средства исследований

Ранее авторами были получены решения по повышению четкости исходных данных. В частности, при использовании бинарных изображений на прямоугольных растрах, осуществлялась предварительная фильтрация [8], позволяющая воспользоваться определенными эвристическими зависимостями для получения границ исследуемого объекта [9]. Некоторые из них могут быть использованы в предлагаемом исследовании.

Имеющиеся возможности и предлагаемые решения

В качестве удобного инструментария для исследования обратимся к клеточным автоматам (КА) [10]-[13], [15] – набору «клеток, образующих некоторую периодическую решетку с заданными правилами перехода, определяющими состояние клетки b_j в следующий момент времени через состояние клеток, находящихся от нее на расстоянии не больше некоторого, в текущий момент времени» [14].

$$b_j \in \{0, 1, 2, \dots, k\} \quad b_i \quad (1)$$

Изменение состояния такого автомата производится в соответствии с некоторым правилом перехода, например:

$$b_j(t+1) = f(b_j(t) | (k, l) \in \Omega(i, j)), \quad (2)$$

где $\Omega(i, j)$ – определенная окрестность точки (i, j)

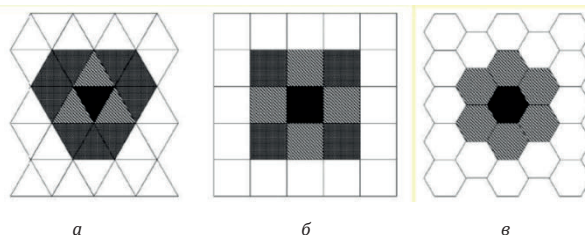
Как правило, «рассматриваются автоматы, где состояние определяется самой клеткой и ближайшими соседями» [2]. Применительно к прямоугольным решеткам (рисунок 1б) речь идет о 4-х связности (окрестность фон Неймана):

$$\Omega_N^1(i, j) = \{(k, l) | |i-k| + |j-l| \leq 1\} \quad (3)$$

и 8-ми связности (окрестность Мура):

$$\Omega_M^1(i, j) = \{(k, l) | |i-k| \leq 1, |j-l| \leq 1\} \quad (4)$$

В данном исследовании ограничимся прямоугольными решетками, хотя основные выводы будут справедливы для треугольных (рисунок 1а) и гексагональных (рисунок 1в) решеток.



Р и с. 1. Примеры окрестностей фон Неймана (серые клетки) и Мура (серые + темные клетки) на регулярных решетках

Fig. 1. Examples of von Neumann (grey cells) and Moore (grey + dark cells) neighborhoods on regular lattices

Состояние «каждой ячейки в момент времени $t=n \cdot t_0$ характеризуется некоторой, в общем случае, векторной переменной, которая может состоять из нескольких целых, действительных или комплексных чисел». Применительно к данному исследованию, ограничимся целыми числами.

Текущие состояния ячеек «изменяются синхронным образом через дискретные интервалы времени в соответствии с локальными правилами, в зависимости от состояния переменных в ближайших соседних» [16] (по Муру) узлах. В нашем случае новое состояние клетки зависит, в том числе, от текущего её состояния, то есть речь идет о КА с памятью. Рассмотрим разработанное ранее устройство фильтрации бинарного изображения как вариант клеточного автомата. Целью разработки устройства фильтрации является повышение быстродействия за счет распараллеливания выполняемых процедур, характерного для КА, имеющего параллельную (не «фоннеймановскую») архитектуру, хотя и разработанную тем же фон Нейманом. Соответственно, предлагаемому устройству фильтрации присущи основные свойства классической модели клеточных автоматов, в том числе [16]-[19]:

- локальность правил – на новое состояние клетки могут влиять только элементы её окрестности, и она сама;
- однородность системы (с учетом краевых эффектов);
- множество возможных состояний клетки – конечно;
- значения во всех клетках меняются одновременно, в конце итерации, а не по мере вычисления.

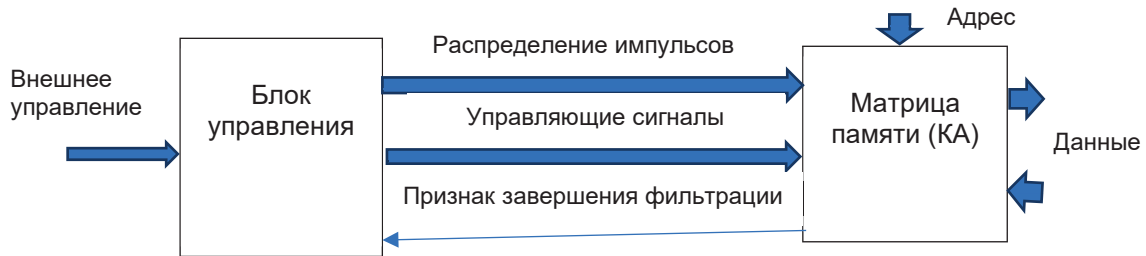
На рис.2 представлена общая схема устройства, на рис.3 – вариант конструктивного исполнения ячейки в матрице памяти. Рассматривая устройство фильтрации как клеточный автомат, следует отметить его некоторые особенности. Так, управление работой КА осуществляется централизованно, с помощью единого блока управления, обеспечивающего за счет синхроимпульсов (СИ) переход от момента $t=n \cdot t_0$ к моменту $t=(n+1) \cdot t_0$. Ус-



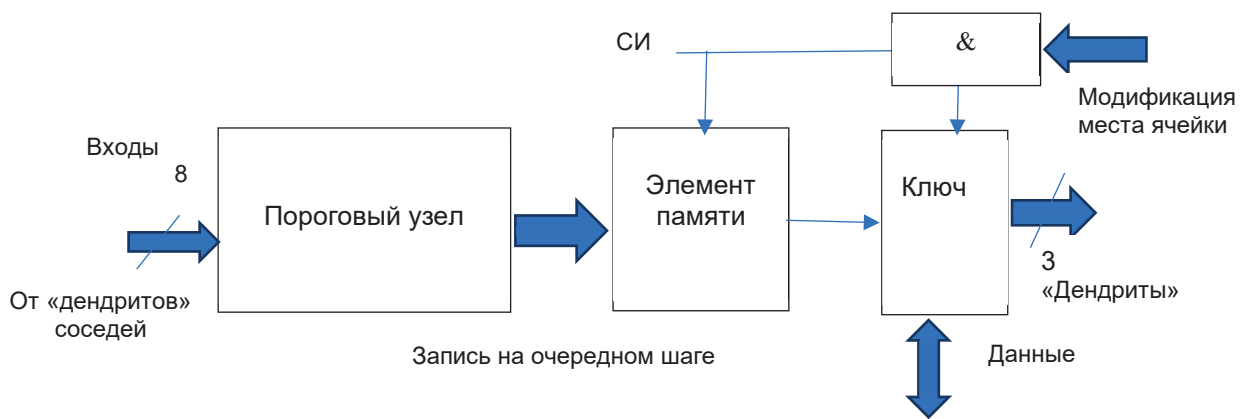
ловием окончания фильтрации является повторное состояние информации в матрице памяти. Как показали исследования [18], для аддитивных помех количество шагов фильтрации не превышает пяти. Заполнение матрицы памяти исходной информацией – бинарным изображением осуществляется в виде адресной записи исходного массива в эту матрицу.

Так как каждый элемент клеточного автомата имеет одну и ту же структуру (условие однородности КА), то учет краевых эффектов: особенности функционирования ячеек на грани-

цах и в углах информационного массива осуществляется за счет управления ключом (рис. 3). Процесс фильтрации предполагает изменения содержимого элемента памяти ячейки в зависимости от соседних восьми элементов информационной матрицы. Так как этот процесс базируется на использовании «связностной» информации, когда значения выходов конкретных ячеек влияет на будущие значения выходов у их соседей, можно провести определенную параллель с нейронами и говорить о так называемых условных «дендритах».



Р и с. 2. Общая схема устройства параллельной фильтрации
F i g. 2. General scheme of parallel filtering



Р и с. 3. Элемент матрицы памяти (КА)
F i g. 3. Memory Matrix Element (CA)

Результатом фильтрации является относительно упорядоченный информационный массив изображения, позволяющий осуществлять автоматическое сегментирование и последующую идентификацию проблемно ориентированных объектов на снимках и оценивать их состояние¹. Подробнее этот процесс рассмотрим ниже. Отметим на данный момент еще одну возможность сегментации и выделение соответствующих границ (контуров). Если учесть, что к граничным точкам (точкам контуров) относятся те, у которых имеется хотя бы один сосед, не относящийся к искомому объекту, а остальные пиксели имеют только фоновых или только «объектных» соседей, можно получить чисто контурное изображение, реализовав после заявленной фильтрации процедуру для каждого пикселя a_{ij} решетки:

¹ Там же.

$$a_{ij} = b_{ij} \& \oplus \overline{d_{ij}^k} \quad (5)$$

где a_{ij} - новое значение элемента изображения;

b_{ij} - значение элемента после фильтрации;

d_{ij}^k - соседние с (ij) -м пикселем $k = \overline{1,8}$;

\oplus - оператор сложения по модулю 2 (исключающее ИЛИ).

Аппаратная реализация процедуры сложности также не вызывает.

Формирование признаков контурного распознавания протяженных объектов

Помимо предложенного выше способа формирования границ (5) протяженных и площадных объектов, получила распространение методика выделения контуров с использованием



цепных кодов Фримена. Предлагаемая методика хорошо зарекомендовала себя и может быть применена, например, в рамках мониторинга протяженных объектов сельхозназначения [20] средствами ДЗЗ² [21]-[25], а также при геологоразведке и добыче полезных ископаемых открытым способом [18] или других областях.

Кроме того, помимо собственно идентификации, предлагаемый подход позволяет повысить точность определения местоположения и расположения подвижных робототехнических средств «в местной системе координат целевого объекта за счет учета его расположения относительно соседних с ним объектов» [18].

Для обеспечения условий успешной идентификации протяженных объектов, представленных на изображениях земной поверхности, целесообразно выполнить некоторую предварительную обработку исходного (сырого) изображения, а также [18]:

- приведение изображения объекта, вводимого в вычислительное устройство, к нормальному, стандартному для данного способа видоизменению масштаба;
- центрирование, вписывание в прямоугольник требуемого размера;
- выделение контуров всех объектов на снимке;
- формирование признаков распознавания, инвариантных к повороту;
- поочередное сравнение с хранящимися в памяти компьютера эталонами, которые хранят в виде векторной модели.

Причем сравнение производится посредством нейронной сети путем анализа признаков формы контура каждого из находя-

щихся на изображении объектов земной поверхности, производят сравнение по каждому признаку, и принимают решение о совпадении векторных моделей целевого объекта на изображении и эталонных объектов [18], [24].

Форма контура исследуемого объекта может быть оценена несколькими способами, в том числе с помощью цепного кода (цепочка целых положительных чисел $R_i \in \{0, 1, 2, \dots, 7\}$, $i = \overline{1, S}$, где S – количество элементарных векторов, образованных переходами между соседними точками контура и закодированных по Фримену от 0 до 7), разностной кода (который представляет из себя $S-1$ значение разностей $P_i = R_{i+1} - R_i$).

В рамках эксперимента по проекту СМАРТ из открытых источников были взяты спутниковые снимки и обработаны при помощи программного средства АИС «Система анализа космических снимков» АИС «САКС» [18]. Программное средство позволяет отслеживать границы на загруженном растровом изображении при помощи специального эвристического алгоритма [8]. В текущей версии программного средства в качестве дополнительных признаков идентификации встроена возможность построения триангуляции, если на снимке найдено больше трех границ. Триангуляция строится по вычисленным точкам, соответствующим «центрам тяжести» отслеженных контуров, вычисляемых на основе их параметрических представлений.

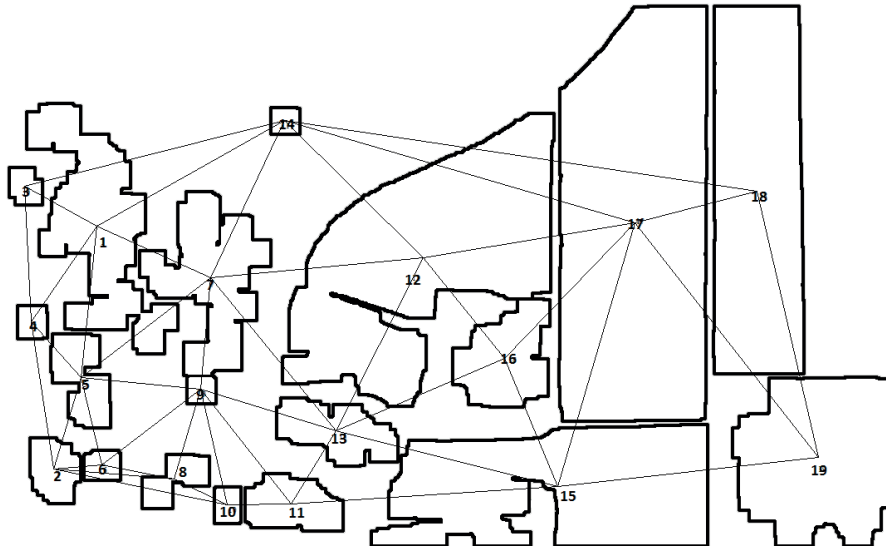
В рамках эксперимента были обработаны различные спутниковые изображения в растровом формате (например, см. рис. 4). Пример обработанного снимка показан на рисунке 5 и в таблице 1 показан пример построенной триангуляции по данным, полученным с представленного изображения.



Р и с. 4. Пример исходного снимка. Цифрами обозначены наиболее значимые объекты
F i g. 4. An example of the original snapshot. The numbers indicate the most significant objects

² Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.





Р и с. 5. Пример построения триангуляции по спутниковому снимку местности.

Цифрами пронумерованы найденные контуры

Fig. 5. An example of triangulation based on satellite imagery. Numerals indicate the found contours

Полученная информация может быть использована в качестве атрибутивной для оценки состояния объектов в различных отраслях (например, в горной промышленности, в сельском хозяйстве, при проектировании объектов железнодорожной инфраструктуры и других) и позволяет отследить изменения,

происходящие с другими объектами [8], находящимися на одной территории с исследуемым. Кроме того, такой подход позволяет повысить надежность имеющейся информации и восстанавливать сведения об отсутствующих (или неидентифицируемых в момент съемки) объектах.

Т а б л и ц а 1. Расстояния между точками триангуляции
Table 1. Distances between triangulation points

Ребро триангуляции								Ребро триангуляции							
Точка триангуляции 1			Точка триангуляции 2			Расстояние		Точка триангуляции 1			Точка триангуляции 2			Расстояние	
№ объ-екта	X центра тяжести	Y центра тяжести	№ объ-екта	X центра тяжести	Y центра тяжести	ед.	м.	№ объ-екта	X центра тяжести	Y центра тяжести	№ объ-екта	X центра тяжести	Y центра тяжести	ед.	м.
1	121	275	3	34	227	99,36	556,4	7	258	337	5	102	457	196,8	1102
1	121	275	4	42	390	139,5	781,3	7	258	337	1	121	275	150,3	842,1
3	34	227	4	42	390	163,2	913,9	1	121	275	14	347	148	259,2	1452
5	102	457	4	42	390	89,94	503,7	7	258	337	14	347	148	208,9	1170
5	102	457	1	121	275	183,0	1025	9	246	471	5	102	457	144,7	810,2
9	246	471	7	258	337	134,5	753,4	10	278	610	11	355	609	77,00	431,2
2	69	567	4	42	390	179,0	1002	13	409	521	11	355	609	103,2	578,1
2	69	567	5	102	457	114,8	643,1	12	514	313	13	409	521	233	1304,
5	102	457	6	127	562	107,9	604,4	13	409	521	16	612	434	220,8	1236,
2	69	567	6	127	562	58,21	326,0	13	409	521	15	676	588	275,2	1541
9	246	471	6	127	562	149,8	838,9	16	612	434	15	676	588	166,7	933,9
8	214	579	2	69	567	145,4	814,8	16	612	434	12	514	313	155,7	871,9
8	214	579	6	127	562	88,64	496,4	11	355	609	15	676	588	321,6	1801
8	214	579	9	246	471	112,6	630,7	17	769	271	15	676	588	330,3	1850
9	246	471	13	409	521	170,4	954,8	17	769	271	16	612	434	226,3	1267
7	258	337	13	409	521	238,0	1333	17	769	271	12	514	313	258,4	1447,
12	514	313	14	347	148	234,8	1315	17	769	271	14	347	148	439,6	2461
12	514	313	7	258	337	257,1	1440	17	769	271	18	916	233	151,8	850,3
3	34	227	14	347	148	322,8	1808	17	769	271	19	990	553	358,3	2006
10	278	610	2	69	567	213,3	1195	18	916	233	19	990	553	328,4	1839
10	278	610	8	214	579	71,11	398,2	18	916	233	14	347	148	575,3	3222
9	246	471	10	278	610	142,6	798,8	15	676	588	19	990	553	315,9	1769



Данные о «центрах тяжести» объектов (пример рассчитанных координат и параметров представлен в Таблице 1) дают возможность по-новому взглянуть на процессы на поверхности Земли, связанные, например, с экологическим состоянием территории, добычей полезных ископаемых, и описать их (по-новому рассмотреть снимки и использовать их).

Заключение

Клеточные автоматы «могут обладать весьма сложным поведением, несмотря на простоту описания их клеток»³ и «большой интерес к ним вызван тем, что такие автоматы являются универсальной моделью параллельных вычислений подобно тому, как машины Тьюринга являются универсальной моделью для последовательных вычислений»⁴.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использовать аппарат клеточных автоматов в вопросах мониторинга протяженных объектов изображений, характерных, в том числе и для мониторинга урбанизированной инфраструктуры. Этот аппарат хорошо согласовывается с другими средствами исследований свойств как абстрактных, так и реальных изображений, а с учетом полученных технических и программных решений обладает достаточной перспективой применения. В связи с этим дальнейшие исследования будут направлены на изучение вопросов способов видоизменения формируемых триангуляционных решеток посредством снижения влияния образующихся тупоугольных треугольников, которые влияют на формат представления получаемых результатов. Одним из таких способов является добавление дополнительных точек и перестроение исходной триангуляции. Кроме того, введением подобных дополнительных точек можно задавать расположение потенциально важных объектов, которые могут пострадать в результате распространения какого-либо опасного явления (пожар, разлив опасных веществ, озер и др.)

Список использованных источников

- [1] Храмов, В. В. Концепция функциональной связности измерений геоинформационного пространства региона / В. В. Храмов, С. О. Крамаров, С. А. Рошупкин. – DOI 10.25559/SITITO.16.202002.407-415 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 407-415.
- [2] Kramarov, S. Methodology of Formation of Unite Geo-Informational Space in the Region / S. Kramarov, V. Khramov. – DOI 10.1007/978-3-030-46895-8_24 // Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science; ed. by V. Sukhomlin, E. Zubareva. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1201. – Pp. 309-316.
- [3] Азиков, Д. О. Имитационное табличное моделирование клеточных автоматов / Д. О. Азиков // Новые задачи технических наук и пути их решения: сб. статей межд. НПК. – Пермь: ООО «Аэтерна», 2016. – С. 5-8. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27272320> (дата обращения: 24.06.2021).
- [4] Авдеев, С. А. Новый подход к прогнозированию критических ситуаций с помощью адаптивного неоднородного клеточного автомата / С. А. Авдеев, Н. М. Богатов // Информационные ресурсы России. – 2015. – № 1(143). – С. 37-41. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22996230> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [5] Лукьянов, Г. В. Прикладные аспекты когнитивного моделирования при проектировании сложных информационных систем / Г. В. Лукьянов, Д. А. Никишин. – DOI 10.14357/08696527170110 // Системы и средства информатики. – 2017. – Т. 27, № 1. – С. 134-154.
- [6] Башабшех, М. М. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы Anylogic / М. М. Башабшех, Б. И. Масленников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 6(19). – С. 127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21405226> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [7] Нариньяни, А. С. НЕ-факторы: краткое введение / А. С. Нариньяни // Новости искусственного интеллекта. – 2004. – № 2. – С. 52-63. – URL: <http://www.raai.org/library/ainews/getainews.php?2004> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [8] Майоров, В. Д. Эвристические способы контурного кодирования моделей информационных объектов в системе технического зрения робота / В. Д. Майоров, В. В. Храмов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 1(53). – С. 62-69. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21391925> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [9] Дедегкаев, А. Г. Метод проектирования структуры нейронных сетей на основе клеточных автоматов / А. Г. Дедегкаев, А. А. Рыжков // Universum: технические науки. – 2013. – № 1. – С. 9. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20928478> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [10] Crooks, A. Cellular Automata / A. Crooks. – DOI 10.1002/9781118786352.wbieg0578 // The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment, and Technology. – John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [11] Castro, R. Fine material migration modelled by cellular automata / R. Castro, R. Gómez, L. Arancibia. – DOI 10.1007/s10035-021-01173-8 // Granular Matter. – 2022. – Vol. 24, issue 1. – Article number: 14.
- [12] Dehbozorgi, L. Realization of processing-in-memory using binary and ternary quantum-dot cellular automata / L. Dehbozorgi, R. Sabbaghi, A. Kashaninia. – DOI 10.1007/s11227-021-04152-1 // The Journal of Supercomputing. – 2022. – Vol. 78, issue 5. – Pp. 6846-6874.

³ Наумов Л., Шальто А. Клеточные автоматы - реализация и эксперименты [Электронный ресурс] // Мир ПК. 2003. № 8. URL: <https://www.osp.ru/rsworld/2003/08/166226> (дата обращения: 24.06.2021).

⁴ Шальто А., Тукель Н. От тьюрингова программирования к автоматному [Электронный ресурс] // Мир ПК. 2002. № 2. URL: <https://www.osp.ru/rsworld/2002/02/162920> (дата обращения: 24.06.2021).



- [13] Kakogeorgiou, I. Evaluating explainable artificial intelligence methods for multi-label deep learning classification tasks in remote sensing / I. Kakogeorgiou, K. Karantzas. – DOI 10.1016/j.jag.2021.102520 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – Vol. 103. – Article number: 102520.
- [14] Матюшкин, И. В. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций / И. В. Матюшкин, М. А. Заплетина. – DOI 10.20537/2076-7633-2019-11-1-9-57 // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 9-57.
- [15] García-Martínez, R. Information Mining Processes Based on Intelligent Systems / R. García-Martínez, P. Britos, D. Rodríguez. – DOI 10.1007/978-3-642-38577-3_41 // Recent Trends in Applied Artificial Intelligence. IEA/AIE 2013. Lecture Notes in Computer Science; ed. by M. Ali, T. Bosse, K. V. Hindriks, M. Hoogendoorn, C. M. Jonker, J. Treur. – Springer, Berlin, Heidelberg. – 2013. – Vol. 7906. – Pp. 402-420.
- [16] Короткин, А. А. Клеточно-локальный алгоритм выделения и оценки изменений на бинарных изображениях / А. А. Короткин, А. А. Максимов // Моделирование и анализ информационных систем. – 2014. – Т. 21, № 4. – С. 64-74. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22363150> (дата обращения: 24.06.2021).
- [17] Крамаров, С. О. Системно-инженерный подход к исследованиям сложных многомерных систем на основе мягких моделей / С. О. Крамаров, В. В. Храмов // Интеллектуальные ресурсы – региональному развитию. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 222-228. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36739538> (дата обращения: 24.06.2021). – Рез. англ.
- [18] Методология интеллектуальной навигации для управления автономными подвижными объектами на основе триангуляции Делоне / С. О. Крамаров, О. Ю. Митясова, И. О. Темкин, В. В. Храмов. – DOI 10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 87-98.
- [19] Akperov, G. I. A Fuzzy Semantic Data Triangulation Method Used in the Formation of Economic Clusters in Southern Russia / G. I. Akperov, V. V. Khramov. – DOI 10.1007/978-3-030-35249-3_43 // 10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions – ICSCCW-2019. ICSCCW 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing; ed. by R. Aliev, J. Kasprzyk, W. Pedrycz, M. Jamshidi, M. Babanli, F. Sadikoglu. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1095. – Pp. 340-344.
- [20] Yan, S. Large-scale crop mapping from multi-source optical satellite imageries using machine learning with discrete grids / S. Yan [и др.]. – DOI 10.1016/j.jag.2021.102485 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – Vol. 103. – Article number: 102485.
- [21] Dunker, J. Single view recognition and pose estimation of 3D objects using sets of prototypical views and spatially tolerant contour representations / J. Dunker, G. Hartmann, M. Stohr. – DOI 10.1109/ICPR.1996.547225 // Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition. – IEEE Press, Vienna, Austria, 1996. – Vol. 4. – Pp. 14-18.
- [22] Zhu, Y. Image super-resolution with dense-sampling residual channel-spatial attention networks for multi-temporal remote sensing image classification / Y. Zhu, C. Geiß, E. So. – DOI 10.1016/j.jag.2021.102543 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2021. – Vol. 104. – Article number: 102543.
- [23] Sara, D. Hyperspectral and multispectral image fusion techniques for high resolution applications: a review / D. Sara [и др.]. – DOI 10.1007/s12145-021-00621-6 // Earth Science Informatics. – 2021. – Vol. 14, issue 4. – Pp. 1685-1705.
- [24] Yang, J. Earth Observation data integration and opening system / J. Yang, G. Li. – DOI 10.1109/IGARSS.2016.7730428 // 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – IEEE Press, Beijing, China, 2016. – Pp. 5481-5484.
- [25] Energy-Efficient Pattern Recognition Hardware With Elementary Cellular Automata / A. Morán, C. F. Frasser, M. Roca, J. L. Rosselló. – DOI 10.1109/TC.2019.2949300 // IEEE Transactions on Computers. – 2020. – Vol. 69, issue 3. – Pp. 392-401.

Поступила 24.06.2021; одобрена после рецензирования 15.08.2021; принята к публикации 27.08.2021.

Об авторах:

Крамаров Сергей Олегович, советник президента, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Российская Федерация, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>**, maoovo@yandex.ru

Храмов Владимир Викторович, ведущий научный сотрудник Академии цифрового развития, ЧОУ ВО «Южный университет (ИУБиП)» (344068, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Михаила Нагибина, д. 33А/47), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1848-8174>**, vxramov@inbox.ru

Митясова Ольга Юрьевна, участник временного научного коллектива при научно-образовательном центре СурГУ, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628412, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1895-0077>**, moypocra2012@yandex.ru

Бочаров Анатолий Анатольевич, аспирант кафедры информационных технологий и прикладной математики, Академия цифрового развития, ЧОУ ВО «Южный университет (ИУБиП)» (344068, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пр. Михаила Нагибина, д. 33А/47), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6261-9130>**, a.a.bocharov1980@gmail.com

Гребенюк Елена Владимировна, аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, Политехнический институт, БУ ВО «Сургутский государственный университет» (628412, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3234-6650>**, rev_86@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



References

- [1] Khramov V.V., Kramarov S.O., Roshchupkin S.A. The Concept of Functional Connectivity of Measurements of Geo-Informational Space of the Region. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2020; 16(2):407-415. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202002.407-415>
- [2] Kramarov S., Khramov V. Methodology of Formation of Unite Geo-Informational Space in the Region. In: Ed. by V. Sukhomlin, E. Zubareva. *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. 2020; 1201:309-316. Springer, Cham. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_24
- [3] Azikov D.O. *Imitacionnoe tablinoe modelirovanie kletochnyh avtomatov* [Simulation table modeling of cellular automata]. *Proceedings of the International Conference on New tasks of technical sciences and ways to solve them*. Aeterna, Perm; 2016. p. 5-8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27272320> (accessed 24.06.2021). (In Russ.)
- [4] Avdeev S., Bogatov N. A new approach to predicting critical situations using adaptive non-uniform cellular automaton. *Informatsionnye resursy Rossii* = Information resources of Russia. 2015; (1):37-41. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22996230> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Lukyanov G.V., Nikishin D.A. Applied Aspects of Modeling of Information Systems. *Sistemy i Sredstva Informatiki* = Systems and Means of Informatics. 2017; 27(1):134-154. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527170110>
- [6] Bashabshah M., Maslinkov B. Simulation modeling of the spatial spread of epidemics (cholera for example) using the method of cellular automata using the Anylogic. *Naukovedenie*. 2013; (6):127. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21405226> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Narin'yani A.S. Non-Factors (IM-IN-UN'S): Short Introduction. *Novosti Iskusstvennogo Intellekta*. 2004; (2):52-63. Available at: <http://www.raai.org/library/ainews/getainews.php?2004> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Mayorov V.D., Khramov V.V. Heuristic ways of contour coding of models of information objects in robot vision. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2014; (1):62-69. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21391925> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [9] Dedegkaev A.G., Ryzhkov A.A. The method of designing the structure of neural networks based on cellular automata. *Universum: Engineering Sciences*. 2013; (1):9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20928478> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [10] Crooks A. Cellular Automata. In: *The International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment, and Technology*. John Wiley & Sons, Inc.; 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0578>
- [11] Castro R., Gómez R., Arancibia L. Fine material migration modelled by cellular automata. *Granular Matter*. 2022; 24(1):14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01173-8>
- [12] Dehbozorgi L., Sabbaghi R., Kashaninia A. Realization of processing-in-memory using binary and ternary quantum-dot cellular automata. *The Journal of Supercomputing*. 2022; 78(5):6846-6874. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-04152-1>
- [13] Kakogeorgiou I., Karantzalos K. Evaluating explainable artificial intelligence methods for multi-label deep learning classification tasks in remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021; 103:102520. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102520>
- [14] Matyushkin I.V., Zapletina M.A. Cellular automata review based on modern domestic publications. *Computer Research and Modeling*. 2019; 11(1):9-57. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-1-9-57>
- [15] García-Martínez R., Britos P., Rodríguez D. Information Mining Processes Based on Intelligent Systems. In: Ed. by M. Ali, T. Bosse, K. V. Hindriks, M. Hoogendoorn, C. M. Jonker, J. Treur. *Recent Trends in Applied Artificial Intelligence. IEA/AIE 2013. Lecture Notes in Computer Science*. 2013; 7906:402-420. Springer, Berlin, Heidelberg. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38577-3_41
- [16] Korotkin A.A., Maksimov A.A. Cellular-Local Algorithm for Localizing and Estimating of Changes in Binary Images. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2016; 50(7):453-459. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411616070129>
- [17] Kramarov S.O., Khramov V.V. A systems engineering approach to the study of complex multivariate systems based on soft models. Intellectual resources – regional development. *Intellektual'nye resursy – regional'nomu razvitiyu* = Intellectual Resources for Regional Development. 2018; 4(1):222-228. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36739538> (accessed 24.06.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [18] Kramarov S.O., et al. Delaunay triangulation-based methodology of intelligent navigation and control of mobile objects. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* = Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021; (2):87-98. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98>
- [19] Akperov G.I., Khramov V.V. A Fuzzy Semantic Data Triangulation Method Used in the Formation of Economic Clusters in Southern Russia. In: Ed. by R. Aliev, J. Kacprzyk, W. Pedrycz, M. Jamshidi, M. Babanli, F. Sadikoglu. *10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions – ICSCCW-2019. ICSCCW 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 1095:340-344. Springer, Cham. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35249-3_43
- [20] Yan S., et al. Large-scale crop mapping from multi-source optical satellite imageries using machine learning with discrete grids. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021; 103:102485. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102485>



- [21] Dunker J., Hartmann G., Stohr M. Single view recognition and pose estimation of 3D objects using sets of prototypical views and spatially tolerant contour representations. *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*. IEEE Press, Vienna, Austria. 1996; 4:14-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR.1996.547225>
- [22] Zhu Y., Geiß C., So E. Image super-resolution with dense-sampling residual channel-spatial attention networks for multi-temporal remote sensing image classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021; 104:102543. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102543>
- [23] Sara D., et al. Hyperspectral and multispectral image fusion techniques for high resolution applications: a review. *Earth Science Informatics*. 2021; 14(4):1685-1705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00621-6>
- [24] Yang J., Li G. Earth Observation data integration and opening system. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE Press, Beijing, China; 2016. p. 5481-5484. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730428>
- [25] Morán A., Frasser C.F., Roca M., Rosselló J.L. Energy-Efficient Pattern Recognition Hardware With Elementary Cellular Automata. *IEEE Transactions on Computers*. 2020; 69(3):392-401. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.2019.2949300>

*Submitted 24.06.2021; approved after reviewing 15.08.2021;
accepted for publication 27.08.2021.*

About the authors:

Sergey O. Kramarov, President's advisor, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>, maoovo@yandex.ru

Vladimir V. Khramov, Leading Research Fellow of the Digital Development Academy, Southern University (IMBL) (33A/47 M. Nagibin Ave., Rostov-on-Don 344068, Russian Federation), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1848-8174>, vxpamov@inbox.ru

Olga Yu. Mityasova, Member of the temporary research team at the Scientific and Educational Center of SurSU, Surgut State University (1 Lenin Ave., Surgut 628412, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1895-0077>, moyapocta2012@yandex.ru

Anatoly A. Bocharov, Postgraduate student of the Department of Information Technologies and Applied Mathematics, Digital Development Academy, Southern University (IMBL) (33A/47 M. Nagibin Ave., Rostov-on-Don 344068, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6261-9130>, a.a.bocharov1980@gmail.com

Elena V. Grebenyuk, Postgraduate student of the Department of Automated Information Processing and Control Systems, Polytechnical Institute, Surgut State University (1 Lenin Ave., Surgut 628412, Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3234-6650>, pev_86@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

