ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(2):87-98
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 004.82+622 DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98

МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ

С.О. Крамаров[1], О.Ю. Митясова[1], Темкин И.О.[2], В.В. Храмов[3]

[1] Сургутский государственный университет, научно-образовательный центр, Сургут, Россия, e-mail: moyapocta2012@yandex.ru
[2] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия
[3] Южный университет (Институт управления, бизнеса и права), Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: Предложен новый метод обнаружения и идентификации объектов земной поверхности, как для использования его в процессе навигации горнотранспортного комплекса в целом, так и для отдельных его компонентов. Предложенный авторами способ осуществления навигации автономных подвижных объектов основан на идентификации объектов информационной пространственной сцены (ИПС) в системе технического зрения робота с учетом ее контекста. Рассмотрены этапы и пример реализации предлагаемого способа для автоматической идентификации объектов на изображениях. Техническим результатом данного исследования является повышение достоверности и точности идентификации ИПС в системах технического зрения роботов для определения местоположения подвижного объекта с использованием местной системы координат. Эффект достигается за счет добавления к стандартным процедурам нормализации изображений данных в виде нечетких триангуляций Делоне (НТД), которые сравниваются с НТД интересующей ИПС. Сравнение производится на основе анализа признаков форм, полученных при построении НТД интересующей ИПС объектов земной поверхности, для чего используются как эталонные НТД, так и НТД векторной модели ИПС полученного изображения.

Ключевые слова: навигация, идентификация, нечеткая триангуляция Делоне, информационная пространственная сцена, управление движением, адаптация к нечетким данным, автономный подвижный объект, признаки формы, объекты земной поверхности.

Благодарность: Работа выполнена в рамках исследовательских работ по гранту Российского Научного Фонда (проект № 19-17-00184).

Для цитирования: *Крамаров С.О., Митясова О.Ю., Темкин И.О., Храмов В.В.* Методология интеллектуальной навигации для управления автономными подвижными объектами на основе триангуляции Делоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 87–98. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98.

Delaunay triangulation-based methodology of intelligent navigation and control of mobile objects

S.O. Kramarov[1], O.Yu. Mityasova[1], Temkin I.O.[2], V.V. Khramov[3]

[1] Surgut State University, Scientific and Educational Center, Surgut, Russia, e-mail: moyapocta2012@yandex.ru
[2] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia
[3] Southern University (Institute of Management, Business and Law), Rostov-on-Don, Russia

© С.О. Крамаров, О.Ю. Митясова, И.О. Темкин, В.В. Храмов. 2021.

Abstract: The article proposes a new method for detection and identification of objects on ground surface for navigation of mining and transportation facilities, in the aggregate and individually. The navigation method for self-acting mobile objects is based on identification of objects within an information space scene (ISC) with regard to its context in the system of robot vision. The stages and a case-study of automatic identification of objects in images are presented. Technically, the result of this investigation is the improved accuracy and reliability of the mobile object positioning in ISS using local coordinates in the systems of robot vision. This effect is achieved through addition of the standard normalization procedures with fuzzy clustering of spatial data based on Delaunay triangulation to be compared with fuzzy Delaunay triangulation of an ISS of concern. The comparison involves the attribute analysis of forms obtained in spatial fuzzy clustering based on standard Delaunay triangulation within the test ISS of the ground surface objects and in fuzzy Delaunay triangulation of the vector model of ISS of the obtained image.

Key words: navigation, identification, fuzzy Delaunay triangulation, information space scene, traffic control, adaptation to fuzzy sets, self-acting mobile objects, attributes of form, ground surface objects.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00184.

For citation: Kramarov S. O., Mityasova O. Yu., Temkin I. O., Khramov V. V. Delaunay triangulation-based methodology of intelligent navigation and control of mobile objects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(2):87-98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-87-98.

Введение

Спутниковый мониторинг земной поверхности, основанный на дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса, успешно развивается, охватывая все новые сферы человеческих интересов. Такими направлениями являются в том числе: разведка полезных ископаемых, навигация и управление автономными подвижными объектами (АПО) [1] горных работ [2—4], экологические проблемы и ряд других приложений. Причем многие данные ДЗЗ имеют большой объем открытых космических снимков, практическое применение которых в настоящее время ограничено из-за отсутствия эффективных методов автоматизации процесса распознавания объектов. Одним из важных для распознавания признаков объектов на космоснимках является их селективность на изображениях, а именно: цвет, тон, текстура, топология и др.

Существуют многофункциональные программы редактирования, ретуширование изображений, работа со слоями в палитре RGB, CMYK и др. Однако в целом ряде случаев указанные выше признаки для конкретных исследуемых объектов не обладают достаточной стабильностью — нечетки, способны к сезонным (периодическим) модификациям и т.п. При этом другие объекты на тех же изображениях могут быть идентифицируемы с требуемым качеством.

Известно много методов идентификации объектов на изображениях, в том числе и автоматических. В то же время, необходимый объем информации для обнаружения и исследования целевых объектов на космоснимках и их идентификации зачастую содержится в их форме. Считается, что распознание объекта часто происходит на уровне формы контура объекта, когда формируется некоторый комплексный крите-

рий, фиксирующий переход от фона к объекту распознавания. При этом под контуром в данном случае будем понимать множество пикселей исследуемых объектов, имеющих хотя бы один соседний пиксель, не принадлежащий данному объекту. Для многоградационных изображений контур — это край объекта, где наиболее быстро изменяется градиент функции сигнала. Контур, в отличие от текстуры изображения и фона, обладает определенной независимостью от погоды, освещения, других факторов. На бинарном, двухуровневом цифровом изображении каждый пиксель также либо однозначно принадлежит, либо не принадлежит исследуемому объекту. Поэтому контур можно считать характеристическим (математическим) объектом.

В то же время для контура могут быть выбраны характерные точки, например, вершина холма, горы, небольшое озеро и т.п., или, если невозможно однозначно обнаружить и идентифицировать такой объект, вычисляют центр тяжести плоской фигуры, ограниченной этим контуром, который обладает относительной пространственной устойчивостью (по сравнению с точками самого контура).

Исходная информация об объектах на изображениях по своей природе не точна и нечетка, что вызвано наличием так называемых НЕ-факторов: недоопределенность общих и конкретных знаний о модели изображения вообще и данного объекта изображения в частности; неоднозначность и некорректность модели формирования изображения; неточность (конечная точность) реальных величин, связанная как с ошибками аппроксимации, так и с ошибками измерения; собственно нечеткость (размытость) [5].

Математические и программные средства, оперирующие с такими данными, в общем случае относят в Soft Computing. В нашем случае речь пойдет о «мягких моделях» и «мягких вычислениях», среди которых определенный интерес вызывает «мягкая» или «нечеткая триангуляция».

Состояние вопроса исследований

Навигация (процесс управления определенным объектом в конкретном пространстве передвижения) применительно к горнотранспортному комплексу включает, в первую очередь, свое местоопределение, а для этого необходима идентификация объектов ИПС.

Известно несколько способов обнаружения и идентификации объектов земной поверхности, обеспечивающих успешную навигацию отдельных компонентов и горнотранспортного комплекса [6] в целом. Отметим некоторые, наиболее (с точки зрения авторов) характерные из них.

1. «Способ обнаружения аномалий подстилающей поверхности, который включает получение изображения подстилающей поверхности в виде цифровой матрицы функции яркости $I(x, y)$ от пространственных координат, разбиение изображения на сравнительно однородные по тону участки на основе априорных данных, вычисление фрактальной размерности каждого участка, составление матрицы эталонов из коэффициентов фрактальной размерности каждого участка, разницы между текущим и эталонным значениями фрактальной размерности за пороговый уровень для анализируемого участка» [7].

К недостаткам данного способа можно отнести:

- неоднозначность разбиения изображения на мозаику участков, вызванная недостаточной точностью измерений, приводящая к существенной погрешности вычисления фрактальной размерности;

• использование для идентификации объекта не всей доступной для исследования информации (признаки сигнала изображения);

• недостаточную информативность единственного признака, вызванную малым интервалом изменения функции фрактальной размерности изображения, что снижает достоверность идентификации;

• существенную зависимость результатов идентификации от технологического шума.

2. «Способ автоматической идентификации объектов на изображениях. Задача, решаемая данным способом, состоит в автоматической идентификации объектов на изображениях путем выделения контурного рисунка объекта и количественного сравнения площади рельефа поверхности объекта внутри контура с эталоном.

Согласно данному способу производят сканирование исходного фотоизображения с высоким разрешением. Матрицу полученных отсчетов приводят к масштабу эталонной матрицы путем нормирования пикселей яркости масштабным коэффициентом. Производят разложение полученного изображения на три двумерные матрицы в палитре стандартных цветов RGB. Методами пространственного дифференцирования функции сигнала матриц выделяют контурные рисунки объектов. Поверхности рельефов объектов внутри выделенных контуров аппроксимируют мозаикой треугольников. Площадь мозаик в каждом из каналов рассчитывают по формуле Герона и производят сравнение полученных площадей рельефов поверхности объектов с их значениями для эталонов по критерию достоверности» [8].

Недостатками данного способа в основном те же, что и в предыдущем, при этом добавляются погрешности вычислительных процедур, в частности, связанных с:

• неоднозначностью разбиения изображения на мозаику треугольников, приводящей к существенной погрешности вычисления их площади, тем более по формуле Герона;

• недостаточной информативностью единственного признака — площади объекта, вызванной нечеткостью исходных данных изображения и недостаточной чувствительностью этого признака к вариациям исходных данных, что снижает достоверность идентификации.

3. «Способ идентификации протяженных объектов земной поверхности, при котором выполняют предварительную обработку исходного изображения, приводят изображение объекта, вводимого в вычислительное устройство, к единому масштабу, центрируют, вписывают в прямоугольник требуемого размера, поочередно сравнивают с находящимися в памяти компьютера эталонными объектами» [9], при этом сравнение производят путем сопоставления интегральных признаков формы контура для каждого из находящихся на изображении объектов, затем идентифицируют и соседние с целевым объекты, «определяют центры тяжести целевого и соседних с ним контуров объектов, строят матрицы связности совокупности протяженных объектов, которые используют в качестве дополнительных признаков идентификации» [10], производят их сравнение и принимают решение об окончательной идентификации целевого объекта.

Недостатками данного способа являются: неполное использование доступной информации об объектах на изображении; ограниченные возможности сопоставления информации об исследуемом объекте изображения и остальных идентифицируемых объектов ИПС.

Методы и модели

Задача автоматической идентификации объектов на изображениях, решаемая предлагаемым авторами способом, включает ряд подзадач, в частности:

• подзадача выделения контурного рисунка объекта;

• подзадача количественного сравнения площади и формы поверхности объекта внутри контура с эталоном;

• вычисление (или выбор) координат характерных точек этого контура с последующей нечеткой триангуляцией Делоне [11] этих точек с аналогичными точками контуров всех других объектов ИПС на изображении в целом.

Технический результат достигается тем, что способ идентификации объектов на изображениях методом нечеткой триангуляции включает:

• сканирование исходного изображения с высоким линейным и амплитудным разрешением;

• приведение матрицы полученных отсчетов к масштабу эталонной матрицы;

• разложение полученного изображения на *n* двумерных матриц, соответствующих выбранным каналам и частотным диапазонам;

• выделение контурных рисунков объекта в каждом из выбранных каналов;

• нахождение (нечетких) центров тяжести плоских объектов изображения, ограниченных соответствующими контурами;

• нахождение центров тяжести всех объектов данной сцены на изображении;

• осуществление нечеткой триангуляции Делоне всей нерегулярной совокупности характерных точек сцены;

• идентификация полученной многомерной матрицы смежности объектов изображения с эталонной.

На рис. 1 и 2 (см. Приложение, с. 97) приведен пример использования автоматической идентификации объектов на спутниковых изображениях ДЗЗ.

Применительно к снимку (рис. 1 и 2) найденные центры тяжести представлены в табл. 1.

Предлагаемый нами способ может быть реализован в нескольких вариантах, в частности, при $n = 1$ осуществляется обработка гиперспектрального изображения по одному каналу связи. Значительное число спутников представляет именно такие снимки. В качестве варианта может быть монохромное изображение с несколькими «уровнями серого».

При $n = 3$ осуществляется предварительное разбиение (в ходе предварительной обработки) исходного гиперспектрального изображения на три проекции (R, G, B). Обработку полученных изображений по трем соответствующим каналам и идентификацию объектов по форме осуществляют путем расчета признаков их контуров в границах, выделенных, соответственно, в каналах R, G, B. Далее сопоставляются вычисленные признаки с их эталонными значениями и принимается решение об идентификации на основании предоп-

Таблица 1

Центры тяжести всех объектов конкретной отраженной на спутниковом снимке ИПС, для которых проведена контурная идентификация [12]
The centers of gravity of all objects, for which is contour identification [12] was performed and which are belong to the information spatial scene, which is reflected on the satellite image

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
X	112	134	255	242	410	322	432	455	473	520	555	632	642	789	818
Y	357	538	319	286	183	280	42	100	401	137	404	473	404	396	228

ределенного правила мажоритирования (например, два из трех).

Часть спутников, например, LandSat [13—14], предоставляет сформированные на борту спектрозональные изображения. В этом случае осуществляется обработка полученных изображений по *n* соответствующим каналам, идентификация объектов по форме (контуру) осуществляют путем расчета признаков их контуров в границах выделенных, например, как это показано в [9], соответственно, *n* каналов. Затем осуществляется сопоставление вычисленных признаков с их эталонными значениями и принятием решения об идентификации на основании предопределенного правила мажоритирования. В этом случае, в зависимости от решаемой задачи, насколько, например, опасно обнаруженное свойство (значение признака) для принятия решения, может быть достаточно двух-трех или даже одного (из 10—15 каналов) с «опасным» признаком.

Вариантом последнего случая может быть такой, что на основе исходных *n* изображений формируется *n* матриц значений функций принадлежности элемента (пикселя) $I(x,y)$ искомому свойству подстилающей поверхности, например, определенному типу растения в заданной фазе вегетации.

Вариант реализации данного способа обеспечивает высокую оперативность и простоту выполнения. Идентификация объекта реализуется применительно к бинаризованному (объект-фон) изображению, при этом выделение контура осуществляется с помощью специального эвристического алгоритма [9].

В предлагаемом способе в качестве дешифровочных признаков предложены триангуляции Делоне, обладающие тем полезным свойством, что исходные данные и, соответственно, координаты характерных точек ИПС нечеткие, возможные отрезки имеют разную длину. С учетом того, что «триангуляция, по определению, планарный граф, все внутренние области которого являются треугольниками, задачей построения триангуляции по заданному (характеристическому) набору двумерных точек называется задача соединения этих точек непересекающимися отрезками так, чтобы образовалась треугольники».

Для однозначности триангуляции мы можем потребовать выполнения, например, условия Делоне или его обобщения [15—16]. Причем триангуляция удовлетворяет условию Делоне, если внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции. При этом считается, что треугольник триангуляции удовлетворяет условию Делоне, если этому условию удовлетворяет триангуляция, составленная только из этого треугольника и трех его соседей [10].

Очевидно, что исходные изображения ИПС объектов земной поверхности в системах технического зрения спутников могут быть подвергнуты триангуляции Делоне.

Порядок реализации способа

После масштабирования исходного изображения (рис. 1) для повышения достоверности идентификации осуществляют разложение исходной матрицы (изображения) на три ортогональных в стандартной палитре цветов RGB. Применительно к обработке космической информации могут быть использованы спектрозональные снимки. Далее выделяют контурные рисунки объекта во всех каналах, например, методами пространственного дифференцирования функции сигнала матриц.

На рис. 5 и 6 (см. Приложение, с. 98) показан вариант построения триангуляции Делоне на фрагменте сцены изображения подстилающей поверхности.

Полученное контурное изображение в одном из каналов иллюстрируется рис. 4. Подробное исследование программы выделения контуров приведено в работе [12]. Формирование первичных контурных признаков исследуемых объектов и их идентификацию по форме осуществляют путем вычисления коэффициентов разложения в ряды ортогональных функций и сравнения их с эталонными значениями.

Точки контура каждого из «ориентирных» объектов имеют нечеткие координаты, а вот «центр тяжести» объекта на изображении обладает существенной стабильностью [17], поэтому может выступать в качестве «характерной точки» при выполнении схемы триангуляции Делоне. Именно поэтому авторы статьи считают, что для получения достоверной идентификации объекта изображения помимо собственно «контурной идентификации» необходима еще и «контекстная», пространственная, использующая триангуляцию Делоне. На способ и техническую реализацию данного подхода получено положительное решение о выдаче патента [17].

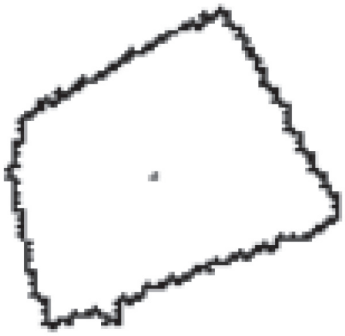

Рис. 3. Пример выделения контура (№ 1 на рис. 4) посредством эвристического алгоритма, подробно рассмотренного в [12]

Fig. 3. An example of contour (No. 1 in Fig. 4) tracking with using a heuristic algorithm, discussed in detail in [12]

В итоге на ИПС системой технического зрения фиксируются присутствующие там объекты. Далее мы получаем набор «опорных точек» (центров тяжести), которые в момент съемки объективно задают координаты этих объектов. Иногда возникает ситуация, когда часть объектов сцены не идентифицирована. Так как речь идет о мониторинге, то есть производятся регулярные съемки данной территории, то предва-

Рис. 4. Выделение контуров объектов всей ИПС и их идентификация

Fig. 4. Contours tracking for all of the objects, which are belong to the information spatial scene and their identification

рительная триангуляция уже проводилась. Это позволяет восстановить информацию об отсутствующих (или неидентифицируемых в момент съемки) объектах. Такой подход позволяет повысить надежность системы навигации на конкретном участке территории.

Выводы

Таким образом, в рамках данной работы были исследованы известные способы обнаружения и идентификации целевых объектов земной поверхности, оценены их особенности, достоинства и недостатки. На основании проведенного анализа состояния дел с решением этой задачи был разработан и предложен новый способ идентификации подстилающих объектов земной поверхности с целью ее использования для навигации автоматических или автоматизированных автономных подвижных объектов, к которым и относятся горнотранспортные комплексы. Использование для навигации элементов ГТК помимо контурной идентификации еще и триангуляции Делоне позволяет надеяться на возможность повышения достоверности получаемых данных и, соответственно, эффективность навигации на горнотранспортных комплексах. Авторы планируют в дальнейшем предложить данный метод для апробирования его на конкретных горнодобывающих объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marino H., Ferrati M., Settimi A., Rosales C., Gabiccini M.* On the problem of moving objects with autonomous robots: a unifying high-Level planning approach // IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 469—476.

2. *Темкин И. О.*, *Гончаренко А. Н.* Проблемы моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов на горнопромышленном предприятии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2013. — № 4—2 (183). — С. 252—259.

3. *Клебанов А. Ф.* Информационные системы горного производства и основные направления развития автоматизации открытых горных работ // Горная промышленность. — 2015. — № 2 (120). — С. 93—96.

4. Каплунов Д.Р, *Мельник В. В.*, *Рыльникова М. В.* Комплексное освоение недр. — Тула: ТулГУ, 2016. — 333 с.

5. *Нариньяни А. С.* Недоопределенность в системах представления и обработки знаний // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. — 1986. — № 5. — С. 3—28.

6. *Temkin I. O.*, *Deryabin S.*, *Konov I.*, *Kim M.* Possible architecture and some neuro-fuzzy algorithms of an intelligent control system for open pit mines transport facilities // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. 2019. Vol. 320. Pp. 412—420. DOI: 10.3233/FAIA190205.

7. *Давыдов В. Ф.*, *Новоселов О. Н.*, *Щербаков А. С.*, *Парамонов С. В.*, *Мещерякова И. А.* Патент РФ № 2160912, 20.12.2000. Способ обнаружения аномалий подстилающей поверхности. 2000. Бюл. № 35.

8. *Давыдова С. В.*, *Давыдов В. Ф.*, *Корольков А. В.*, *Комаров Е. Г.* Патент РФ № 2514155, 27.04.2014. Способ автоматической идентификации объектов на изображениях. 2014. Бюл. № 12.

9. *Акперов И. Г.*, *Крамаров С. О.*, *Храмов В. В.*, *Митясова О. Ю.*, *Повх В. И.* Патент РФ № 2640331, 27.12.2017. Способ идентификации протяженных объектов земной поверхности. 2017. Бюл. 36.

10. *Скворцов А. В.* Триангуляция Делоне и ее применение. — Томск: Изд-во ТГУ, 2002. — 128 с.

11. *Blazek J.* Computational fluid dynamics: principles and applications. Amsterdam: Elsevier, 2015. 466 p. DOI: 10.1016/C2013-0-19038-1.

12. *La Jeunesse Connette K. J., Connette G., Bernd A., Paing Phyo, Kyaw Htet Aung, Ye Lin Tun, Zaw Min Thein, Horning N., Leimgruber P., Songer M.* Assessment of mining extent and expansion in Myanmar based on freely-available satellite imagery // Remote sensing. 2016, Vol. 8. No 11. P. 912. DOI: 10.3390/rs8110912.

13. *Jing Li*, *Zipper C. E.*, *Donovan P. F.*, *Wynne R. H.*, *Oliphant A. J.* Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. No 9. P. 557. DOI: 10.1007/s10661-015-4766-1.

14. *Клячин А. А.* Построение триангуляции плоских областей методом измельчения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. — 2017. — № 2(39). — С. 18—28. DOI: 10.15688/jvolsu1.2017.2.2.

15. *Клячин В. А.* Алгоритм триангуляции, основанный на условии пустого выпуклого множества // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. — 2015. — № 3(28). — С. 27–33. DOI: 10.15688/jvolsu1.2015.3.3.

16. *Крамаров С. О.*, *Храмов В. В.*, *Митясова О. Ю.* Спутниковая идентификация объектов добычи полезных ископаемых на месторождениях разрабатываемых открытым способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 72—79. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-72-79.

17. *Крамаров С. О.*, *Храмов В. В.*, *Повх В. И.*, *Грошев А. Р.*, *Каратаев А. С.*Заявка на изобретение № 2018126535, 18.07.2018. Способ идентификации объектов на цифровых изображениях подстилающей поверхности методом нечеткой триангуляции Делоне. 2020. Бюл. 2. ГИАБ

REFERENCES

1. Marino H., Ferrati M., Settimi A., Rosales C., Gabiccini M. On the problem of moving objects with autonomous robots: a unifying high-Level planning approach. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 1. No. 1. Pp. 469—476.

2. Temkin I. O., Goncharenko A. N. Interaction modelling problems of intellectual agents at the mining enterprise. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013, no 4—2 (183), pp. 252—259. [In Russ].

3. Klebanov A. F. Information systems of mining production and main development directions of open pit mining automation. *Russian Mining Industry*. 2015, no 2 (120), pp. 93—96. [In Russ].

4. Kaplunov D.R, Mel'nik V. V., Ryl'nikova M. V. *Kompleksnoe osvoenie nedr* [Complex development of mineral resources], Tula, TulGU, 2016, 333 p.

5. Narin'yani A. S. Under-definition in knowledge representation and processing systems. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*. 1986, no 5, pp. 3—28. [In Russ].

6. Temkin I. O., Deryabin S., Konov I., Kim M. Possible architecture and some neuro-fuzzy algorithms of an intelligent control system for open pit mines transport facilities. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2019. Vol. 320. Pp. 412—420. DOI: 10.3233/FAIA190205.

7. Davydov V. F., Novoselov O. N., Shcherbakov A. S., Paramonov S. V., Meshcheryakova I. A. *Patent RU 2160912*, 20.12.2000.

8. Davydova S. V., Davydov V. F., Korol'kov A. V., Komarov E. G. *Patent RU 2514155*, 27.04.2014.

9. Akperov I. G., Kramarov S. O., Khramov V. V., Mityasova O. Yu., Povkh V. I. *Patent RU 2640331*, 27.12.2017.

10. Skvortsov A. V. *Triangulyatsiya Delone i ee primenenie* [Delaunay triangulation and its application], Tomsk, Izd-vo TGU, 2002. 128 p.

11. Blazek J. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 466 p. DOI: 10.1016/C2013-0-19038-1.

12. La Jeunesse Connette K. J., Connette G., Bernd A., Paing Phyo, Kyaw Htet Aung, Ye Lin Tun, Zaw Min Thein, Horning N., Leimgruber P., Songer M. Assessment of mining extent

and expansion in Myanmar based on freely-available satellite imagery. *Remote sensing*. 2016, Vol. 8. No 11. P. 912. DOI: 10.3390/rs8110912.

13. Jing Li, Zipper C. E., Donovan P. F., Wynne R. H., Oliphant A. J. Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. Vol. 187. No 9. P. 557. DOI: 10.1007/s10661-015-4766-1.

14. Klyachin A. A. The construction of the triangulation of plane domains by grinding method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Maematika. Fizika*. 2017, no 2(39), pp. 18 — 28. [In Russ]. DOI: 10.15688/jvolsu1.2017.2.2.

15. Klyachin V. A. Triangulation Algorithm Based on Empty Convex Set Condition. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Maematika. Fizika*. 2015, no 3(28), pp. 27–33. [In Russ]. DOI: 10.15688/jvolsu1.2015.3.3.

16. Kramarov S. O., Khramov V. V., Mityasova O. Yu. Satellite identification of mineral deposits under open pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 5, pp. 72 — 79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-72-79.

17. Kramarov S. O., Khramov V. V., Povkh V. I., Groshev A. R., Karataev A. S. *Patent application No 2018126535*, 18.07.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крамаров Сергей Олегович[1] — д-р физ.-мат. наук, профессор,
главный научный сотрудник, e-mail: maoovo@yandex.ru,
Митясова Ольга Юрьевна[1] — участник временного научного коллектива,
Темкин Игорь Олегович — д-р техн. наук, доцент,
зав. кафедрой, e-mail: temkin.io@misis.ru, НИТУ «МИСиС»,
Храмов Владимир Викторович — канд. техн. наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, e-mail: vxpamov@inbox.ru,
Южный университет (Институт управления, бизнеса и права),
[1] Сургутский государственный университет,
научно-образовательный центр.
Для контактов: Митясова О.Ю., e-mail: moyapocta2012@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.O. Kramarov[1], Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor,
Chief Researcher, e-mail: maoovo@yandex.ru,
O.Yu. Mityasova[1], Member of the Temporary Research Team,
I.O. Temkin, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Head of Chair, e-mail: temkin.io@misis.ru,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia,
V.V. Khramov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Leading Researcher, e-mail: vxpamov@inbox.ru,
Southern University (Institute of Management, Business and Law),
Rostov-on-Don, 344068, Russia,
[1] Surgut State University (SurSU), Scientific and Educational Center,
628412, Surgut, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Ugra, Russia.
Corresponding author: O.Yu. Mityasova,
e-mail: moyapocta2012@yandex.ru.

Получена редакцией 13.05.2020; получена после рецензии 15.09.2020; принята к печати 10.01.2021.
Received by the editors 13.05.2020; received after the review 15.09.2020; accepted for printing 10.01.2021.

Рис. 1. Исходное изображение
Fig. 1. Original image

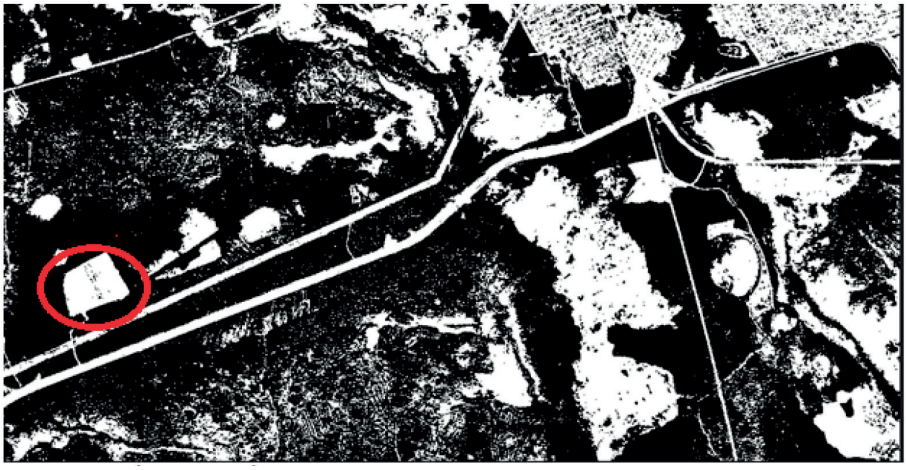

Рис. 2. Исходное изображение после бинаризации
Fig. 2. Original image after binarization

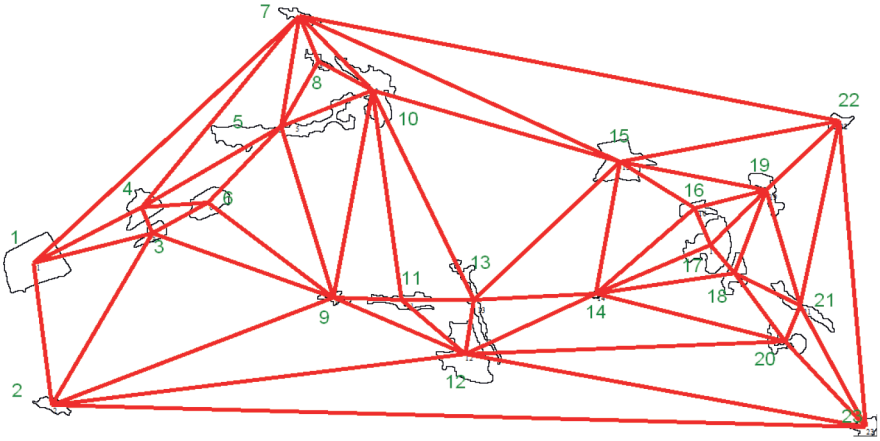

Рис. 5. Триангуляция Делоне на виртуальном контурном рисунке
Fig. 5. Delaunay Triangulation in a virtual contour image

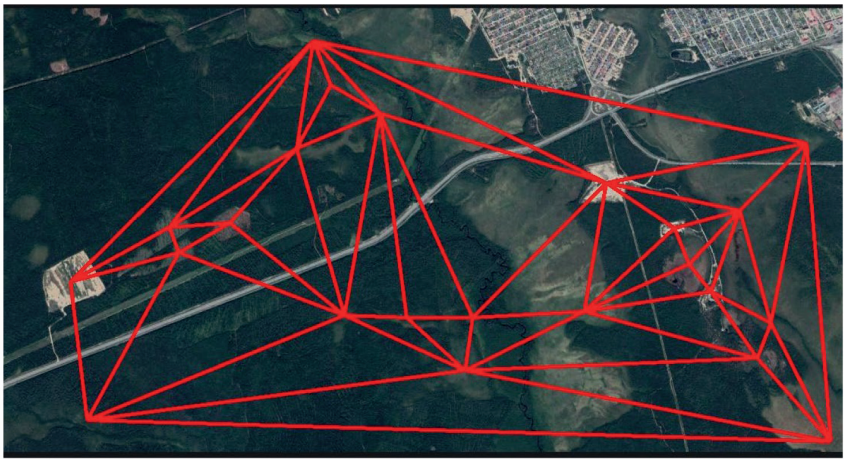

Рис. 6. Триангуляция Делоне, наложенная на спутниковый снимок
Fig. 6. Delaunay Triangulation superimposed on the satellite image