

Разработка методов фильтрации точек лазерного отражения для идентификации техногенных объектов*

С. К. Дулин¹, Д. А. Якушев¹
skdulin@mail.ru; yakush.d@gmail.com

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, 119333, Москва, Вавилова, д. 44, кор. 2

Большой объем получаемых при лазерной съемке пространственных данных предполагает наличие эффективной технологии их обработки. Авторами разработана двухэтапная технология обработки привязанных к высокоточной координатной сети пространственных данных (облака точек), получаемых в результате мобильного лазерного сканирования, обеспечивающая построение цифровой модели пути в соответствии с установленными нормами. Она также может быть применима к результатам фотограмметрической съемки высокого разрешения. Технология включает методы быстрого определения оси пути, алгоритмы построения отдельных элементов инфраструктуры (опор контактной сети), алгоритмы определения профиля железнодорожного полотна, а также методы обработки остальных элементов инфраструктуры (сооружений и устройств хозяйств пути, автоматики и телемеханики, а также телекоммуникационных станционных объектов).

Ключевые слова: анализ пространственных данных, идентификация, фильтрация точек

DOI: 10.21469/22233792.4.5.03

1 Введение

Технология выполнения съемки с помощью мобильного лазерного сканирования (МЛС) является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния протяженных инфраструктурных объектов.

Для ее успешного применения на железной дороге были разработаны эффективные алгоритмы и методы обработки пространственных данных, позволяющих в условиях неоднородности исходных данных создавать цифровую модель пути (ЦМП) с заданной точностью в фиксированный промежуток времени.

ЦМП – это формализованное математическое и семантическое описание геометрических характеристик и пространственного положения железнодорожного пути и других объектов инфраструктуры железной дороги (включая техногенный объекты), получаемое в результате обработки данных геодезических измерений в высокоточном координатном пространстве. Использование пространственных данных о текущем состоянии пути позволяет [1]:

- 1) перейти к цифровому координатному описанию объектов ИЖТ по ее фактическому состоянию;
- 2) осуществлять интервальное регулирование движения поездов;
- 3) перейти на управление по высокоточным картам безопасности, созданным на основе цифровых моделей пути (в дополнение к существующему методу, использующему рельсовые цепи);

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-20-02205).

- 4) перейти к содержанию инфраструктуры в проектом положении на участках, обеспеченных высокоточной проектной документацией;
- 5) перейти на управление проектами с применением технологии информационного моделирования.

2 Методы фильтрации точек лазерного отражения для идентификации техногенных объектов

В настоящее время активно развивается как применение систем мобильного лазерного сканирования, устанавливаемых на штатные вагоны-путьеизмерители (или, как вариант, на пассажирские поезда), так возврат и к традиционной фотограмметрии с использованием современных технических средств — дроны, БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения или компактными лазерными устройствами. Так например, компания Plowman Craven (Великобритания) апробировала беспилотник Vogel R3D (со 100Мп камерой на борту) для съемки железнодорожной инфраструктуры. Анализ результатов уже произведенной на территории Великобритании съемки 20 000 миль железнодорожного пути показал суб-5мм точность определения положения объектов инфраструктуры при проведении измерений с высоты до 30м. Большой объем получаемых при такой съемке данных, предполагает наличие эффективной технологии их обработки [2].

Авторами разработана двухэтапная (в зависимости от дальнейшего использования) технология обработки пространственных данных (облака точек), получаемых в результате мобильного лазерного сканирования и привязанных к высокоточной координатной сети, обеспечивающая построение ЦМП в соответствии с установленными нормами. Она также может быть применима к результатам фотограмметрической съемки высокого разрешения. Технология включает методы быстрого определения оси пути с точностью 3мм, алгоритмов построения отдельных элементов инфраструктуры (опор контактной сети), алгоритмов определения профиля железнодорожного полотна, а также методы обработки остальных элементов инфраструктуры (сооружений и устройств хозяйств пути, автоматике и телемеханики, Трансэнерго, а также телекоммуникационных стационарных объектов). Общая блок-схема показана на рис. 1. Вся технологическая цепочка разбита на несколько отдельных этапов, которые достаточно независимы, операции могут быть распараллелены между отдельными исполнителями. Результат выполнения каждого этапа формализован.

В части автоматизации моделирования объектов инфраструктуры ИЖТ в ходе реализации проекта были разработаны алгоритмы автоматического распознавания опор контактной сети, характерных точек земляного полотна (бровки/подошвы балластной призмы и земляного полотна) и метод векторизации рельсовой нити по точкам лазерного отражения. Приведем описание алгоритма оценки параметров положения опор контактной сети с помощью вероятностного генетического алгоритма, активно использующийся в разработанной технологии [3–6].

Будем считать, что у нас есть трехмерная модель опоры контактной сети, заданная функцией расстояния $f(\mathbf{x}, \mathbf{a})$, которая дает расстояние от точки \mathbf{x} до объекта, пространственное расположение которого, а также другие характеристики определяет вектор параметров \mathbf{a} . Тогда оценивание вектора параметров по множеству точек $X = \{\mathbf{x}_i\}$ может быть получено как решение следующей оптимизационной задачи:

$$F(X, \mathbf{a}) = \sum_{\mathbf{x}_i \in X} f^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{a}) \rightarrow \min$$

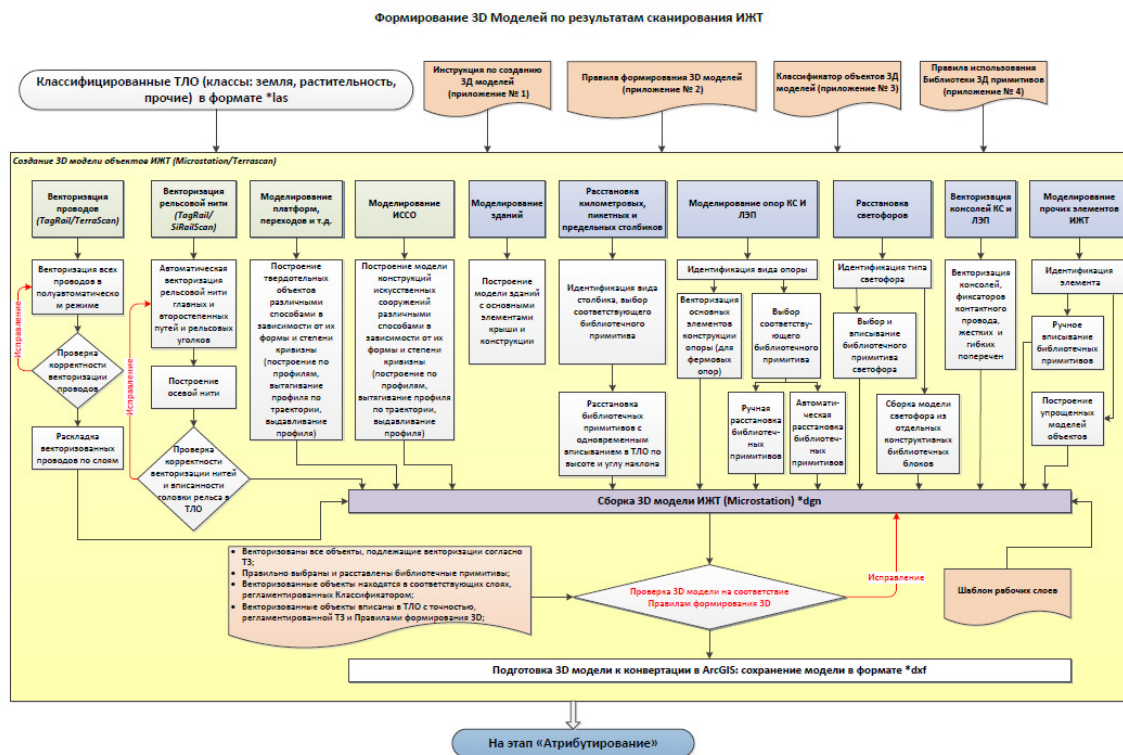


Рис. 1 Общая блок-схема фильтрации точек лазерного отражения и формирования трехмерных цифровых моделей пути.

относительно вектора параметров \mathbf{a} . Поскольку функционал $F(X, \mathbf{a})$, как правило, имеет неважные дифференциальные свойства, которые желательны для применения классических методов оптимизации, например, градиентных методов, в работе предлагается метод оптимизации, основанный на идее, используемой при построении вероятностных генетических алгоритмов. Данная идея заключается в следующем. Предположим, что имеется вероятностное распределение вектора параметров \mathbf{a} , отражающее информацию о возможных отклонениях \mathbf{a} от нормативных показателей. По этому распределению генерируется выборка (популяция) решений. Далее проводится селекция выборки, заключающаяся в том, что из нее удаляются не оптимальные решения. После этого по усеченной выборке оценивается новое вероятностное распределение решений и рассмотренные выше этапы повторяются. Теоретически получаемая последовательность вероятностных распределений должна сходиться к точечному вероятностному распределению Дирака, которое и определяет искомый глобальный экстремум. При реализации данного подхода требуется выбрать класс вероятностных распределений, в рамках которого можно с достаточной точностью описывать анализируемые последовательности распределений. Очевидно, что выбор оптимального класса вероятностных распределений существенно зависит для решения нашей задачи от идентифицируемых объектов и связанных с ними функциями расстояния. При этом рассматриваемая задача значительно упрощается, если предположить независимость параметров в генерируемых выборках. Такое предположение является достаточно правдоподобным, если считать, что искомые параметры незначительно отклоняются от нормативных. В этом случае, можно предположить, что вероятностное распределение каждого параметра можно аппроксимировать нормальным распределением. Пользуясь предполо-

жениями, описанными выше, можно формализовать предлагаемую схему вычислений с помощью следующей процедуры.

1. Входные данные: функция расстояния $f(\mathbf{x}, \mathbf{a})$, $\mathbf{a}^{(0)}$ — начальное значение вектора параметров, $\sigma^{(0)}$ — начальный вектор среднеквадратических отклонений параметра \mathbf{a} , $i := 0$.
2. Генерация выборки возможных решений $\{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_N\}$ и ее упорядочивание таким образом, чтобы $F(X, \mathbf{a}_1) \leq F(X, \mathbf{a}_2) \leq \dots \leq F(X, \mathbf{a}_N)$.
3. Усечение выборки, которое заключается в том, что мы в ней оставляем наиболее оптимальные решения до некоторого индекса N_1 (N_1 — это параметр алгоритма и выбирается приблизительно равным $0.3N$).
4. Нахождение оценок математического ожидания и среднеквадратических отклонений по усеченной выборке $\{\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_{N_1}\}$:

$$\mathbf{a}^{(i+1)} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \mathbf{a}_k,$$

$$\sigma^{(i+1)} = \sqrt{\frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} (\mathbf{a}_k - \mathbf{a}^{(i+1)})^2},$$

причем в последней формуле операции возведения в степень и извлечения корня предполагаются покоординатными.

5. $i := i + 1$. Если $|\sigma^{(i)}| \leq \varepsilon$, то в качестве решения выбирается $\mathbf{a}^{(i)}$, иначе переход к шагу 1.

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере. Для простоты будем рассматривать модельную задачу, в которой требуется оценить положение “опоры контактной сети” на плоскости. При этом в качестве модели возьмем функцию расстояния

$$f(X) = \min\{d(\mathbf{x}, [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2]), d(\mathbf{x}, [\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4])\},$$

где $\mathbf{r}_1 = (0, 0)$, $\mathbf{r}_2 = (0, 3.5)$, $\mathbf{r}_3 = (-1, 3)$, $\mathbf{r}_4 = (2, 3)$. Будем считать, что опора контактной сети описывается множеством точек $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 | f(\mathbf{x}) \leq 0.1$. В результате моделирования было получено множество сканированных точек, изображенных на рис. 2.

Рассмотрим, как оценивается положение опоры контактной сети по точкам сканирования. Пусть $X = (x, y)$ — поворот и параллельное перемещение столба можно описать с помощью следующего преобразования функции расстояния:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = f(x \cos \alpha + y \sin \alpha + a, -x \sin(\alpha) + y \cos \alpha + b),$$

где $\mathbf{a} = (a, b, \alpha)$ — это вектор параметров. Будем считать, что начальное приближение положения столба описывается вектором $\mathbf{a}^{(0)} = (-0.1, 0.1, 0.01)$. При этом возможные отклонения от данного положения описываются вектором среднеквадратических отклонений $\sigma^{(0)} = (0.2, 0.2, 0.02)$. По данным изображенным на рис. 2 была проверена работа предложенного алгоритма. После 20 итераций была получена следующая оценка пространственного положения опоры контактной сети $\mathbf{a}^{(20)} = (-0.011, 0.024, -0.0033)$. Отметим, что истинное пространственное положение, которое было выбрано при моделирование, описывается вектором $\mathbf{a}^{(20)} = (0, 0, 0)$. Отметим, что $F(X, \mathbf{a}^{(20)}) \leq F(X, \mathbf{a})$, т.е. решение $\mathbf{a}^{(20)}$ является более оптимальным, чем \mathbf{a} . Точность полученного оптимального решения

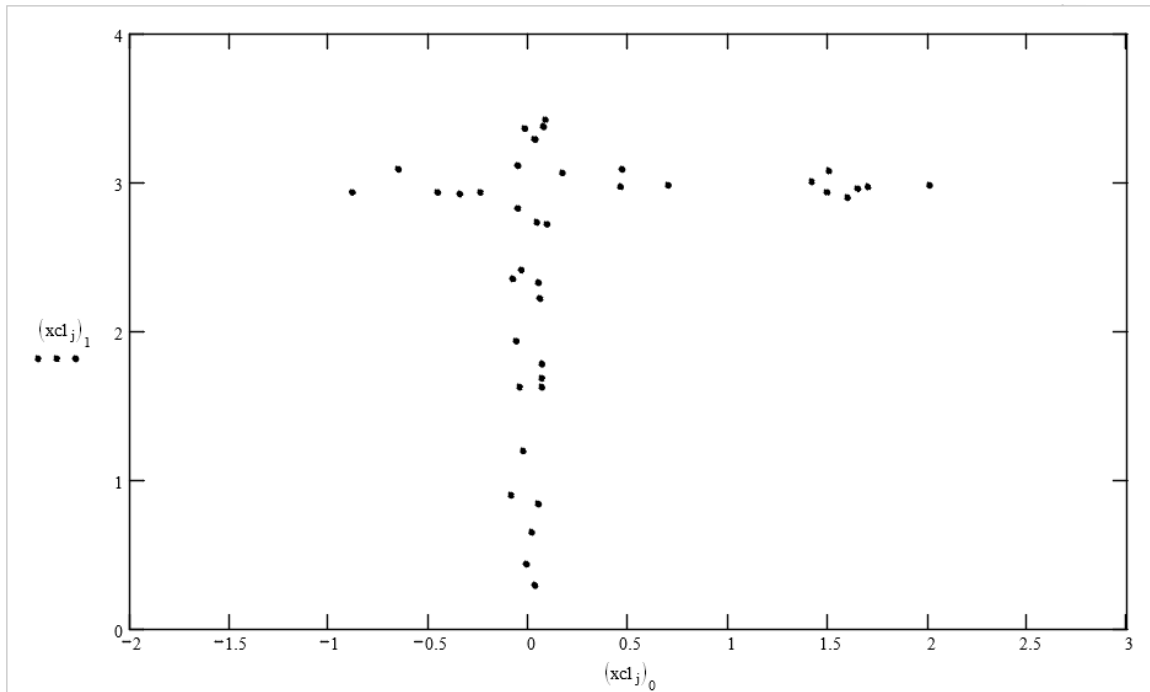


Рис. 2 Множество данных, соответствующих модельному объекту “опора контактной сети”

дает вычисленный вектор $\sigma^{(0)} = (0.000010, 0.000045, 0.000013)$. На практике этот алгоритм реализован в виде утилиты автоматического вписывания опор контактной сети с исходными параметрами, приведенными в 1.

Переменная	Описание
<i>middleGround</i>	Средний уровень земли внутри области поиска
<i>trueHeight</i>	«Истинная» высота опоры
<i>sectionCount</i>	Кол-во сечений
<i>sectionHeight</i> = 0.3 <i>sectionStep</i> = 0.15	Высота (глубина) сечения по Z Промежуток между сечениями
<i>stdReduceTolerance</i> = 2.5	Коэффициент фильтрации при вычислении стандартного отклонения, 2.5 — отбросить все что в 2.5 раза больше среднего
<i>RmaxL</i> = 0.45 <i>RmaxH</i> = 0.32	Ограничения на радиусы столбов, если алгоритм определения радиуса сработает неверно. <i>RmaxL</i> — нижний радиус, <i>RmaxH</i> — верхний радиус
<i>deltaR</i> = 0.01 <i>stepR</i> = 0.003	Разница между внешней и внутренней окружностями вписывания Шаг, с которым происходит вписывание (точность вписывания)
<i>limX</i> = 0.15, <i>limY</i> = 0.15	Пределы вписывания по осям X и Y.
<i>badPointsCount</i>	

Таблица 1 Параметры утилиты автоматического вписывания опор контактной сети в облако точек

На рис. 3 приведен пример автоматического вписывания опоры контактной сети в облако точек лазерного сканирования.

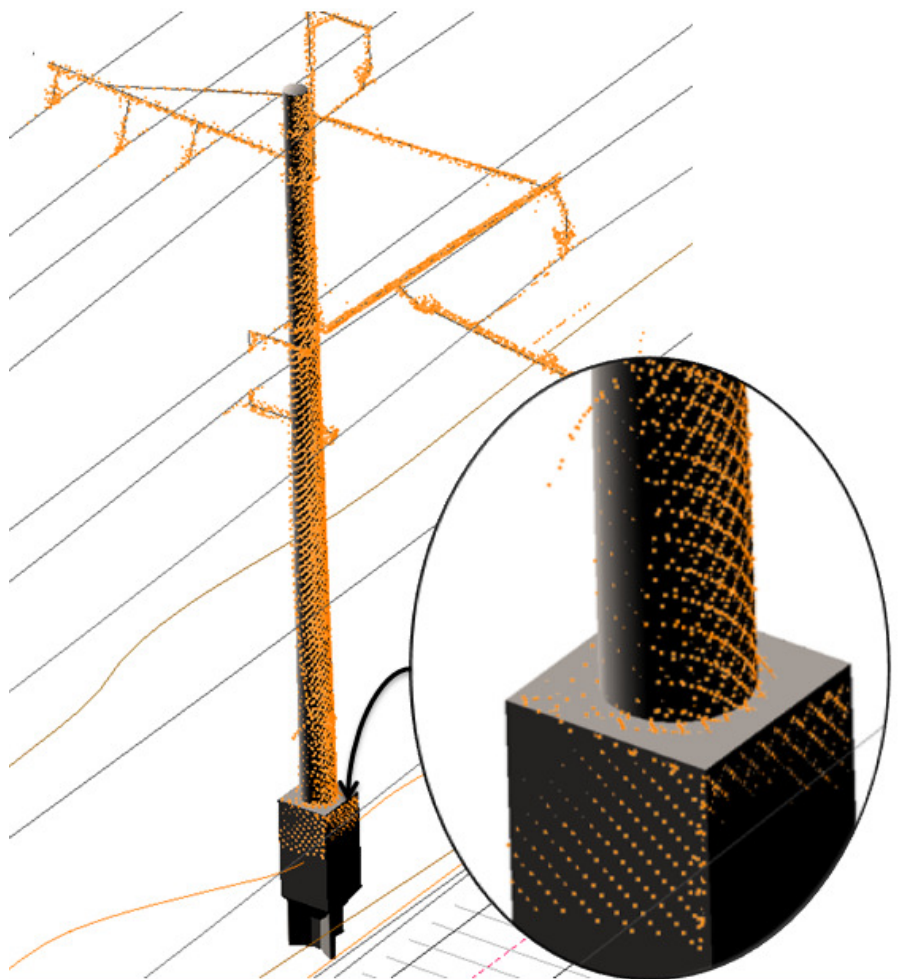


Рис. 3 Множество данных, соответствующих модельному объекту «опора контактной сети.»»

Результаты статистики по созданию “комплексной” (включающей все объекты ИЖТ в полосе отвода) ЦМП на основе разработанной технологии, фильтрации точек лазерного отражения и средств автоматизации построения ЦМП техногенных объектов, приведены в табл. 2.

3 Заключение

Применяемое геодезическое оборудование постоянно совершенствуется, что приводит к валлообразному увеличению входной информации. Предложенная в проекте №17-20-02205 офи-м-РЖД технология обработки пространственных данных предусматривает распараллеливание операций и возможность автоматизации моделирования техногенных объектов по данным лазерного сканирования, что минимизирует время от проведения съемки до получения конечного результата, в виде пространственной базы данных элементов ИЖТ. Автоматический поиск опор контактной сети внутри облака точек реализован с использованием обобщенного преобразование Хафа и аналитических функций расстояния. Задача

Параметр	Значение	Описание
Количество производимых цифровых моделей пути до использования разработанной технологии	24 км/мес.	Указанное значение получено экспериментально в результате анализа производительности собственных подразделений компании, а также при влеченных сторонних организаций
Количество производимых цифровых моделей пути при использовании разработанной технологии	88 км/мес.	В указанное значение входит трудоемкость 5-ти этапов камеральной обработки данных МЛС, необходимых для построения трехмерной ЦМП.

Таблица 2 Результаты использования технологии и средств автоматизации

оценки параметров пространственного положения опоры контактной сети решается с помощью вероятностных генетических алгоритмов.

Использование разработанных методов фильтрации и автоматизации позволило более чем в 3 раза сократить время построения цифровых моделей пути и техногенных объектов.

Литература

- [1] Уманский В. И. Технология построения трехмерных моделей железнодорожного полотна в высокоточном координатном пространстве // Сборник докладов 6-ой Международной научно-практической конференции "Геопространственные технологии и сферы их применения", 2010, Москва, С. 66–67.
- [2] Дулин С. К., Розенберг И. Н., Уманский В. И. Методы кластеризации в исследовании массивов геоданных // "Системы и средства информатики". Дополнительный выпуск., 2009, С. 86–114.
- [3] Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. // 1980, Москва: Мир.
- [4] Bronevich A.G., Itenberg I.I., Karkishchenko A.N. The application of a local method for edge detection. // Proc. of the 6th International Conference on Control, Robotics and Vision, Singapore, 2000. pp. 8–15.
- [5] Hough P.V.C Method and means for recognizing complex patterns. // U.S. Patent 3,069,654, 1962.
- [6] Семерий О. С. Распознавание геометрических объектов с помощью функций расстояния // Сб. трудов Международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений» (РОАИ-6-2002)., В. Новгород, 2002, С. 486–490.

Поступила в редакцию 19.11.2019

Development of methods for filtering laser reflection points (mathematical morphological filtering, progressive filtering, segmentation) for the identification of technogenic objects *

S. K. Dulin¹, D. A. Yakushev¹

skdulin@mail.ru; yakush.d@gmail.com

¹Federal research center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Science, 119333 Moscow Ulitsa Vavilova 44

A large amount of data obtained by laser scanning, imply the presence of effective data processing technology. The authors have developed a two-stage technology of spatial data processing (point cloud), obtained as a result of mobile laser scanning and tied to a high-precision coordinate network, which ensures the construction of the 3D model in accordance with the established norms. It can also be applied to the results of high-resolution photogrammetric photography. The technology includes methods for rapid determination of the railway track, algorithms for the construction of individual elements of the infrastructure (support of a contact network), algorithms to determine the profile of the railway, as well as methods of processing another elements of the infrastructure (facilities and devices of the railway, automatics and telemechanic and telecommunications station facilities).

Keywords: *spatial data analysis, identification, filtering*

DOI: 10.21469/22233792.4.5.03

References

- [1] Umansky V.I. Tekhnologiya postroyeniya trekhmernykh modeley zheleznodorozhnogo polotna v vysokotochnom koordinatnom prostranstve. [Technology of construction of three-dimensional models of a railway track in high-precision coordinate space]. [Proceedings of the 6th International scientific and practical conference “Geospatial technologies and their applications”], Moscow, 2010. pp.66-67. (In Russian)
- [2] Dulin S. K., Rosenberg I. N., Umansky V. I. Metody klasterizatsii v issledovanii massivov geodannykh [Clustering Methods in the study of GEODATA arrays]. [Systems and means of Informatics. Additional issue.]. M.: IPI RAN, 2009. pp. 86-114.(In Russian)
- [3] Brillinger D. Vremennyye ryady. Obrabotka dannykh i teoriya. [Time series. Data processing and theory]. Moscow: Mir, 1980. (In Russian)
- [4] Bronevich A.G., Itenberg I.I., Karkishchenko A.N. The application of a local method for edge detection. *Proc. of the 6th International Conference on Control, Robotics and Vision*. Singapore, 2000. pp. 8-15.
- [5] Hough P.V.C. Method and means for recognizing complex patterns. *U.S. Patent 3,069,654*, 1962.
- [6] Semery O. S. Raspoznavaniye geometricheskikh ob'yektov s pomoshch'yu funktsiy rasstoyaniya [Recognition of geometric objects using functions of the distance]. *Proceedings of the International conference pattern Recognition and image analysis*, Novgorod, 2002. pp. 486-490. (In Russian)

Received November 19, 2019