

МЕТОДИКА УТОЧНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО МАТЕРИАЛАМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКИ

В.А. Вальков, Е.О. Валькова, М.Г. Мустафин

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В статье приведены результаты исследований по уточнению цифровых моделей рельефа местности с помощью облаков точек, получаемых в ходе лидарных съемок или на основе аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов. Установлено, что при моделировании различных форм лишь на основе набора ключевых точек может возникнуть неоднозначность. Определено, что при использовании TIN-моделей для уточнения положения граней целесообразно использовать избыточные точки класса «земля». Показаны варианты реализации подходов с помощью метода наименьших квадратов. Выявлены их эффективность и целесообразность на конкретных примерах. Результаты исследований могут быть полезными при работах, связанных с цифровым моделированием рельефа, в том числе применительно к открытым горным выработкам.

Ключевые слова: открытая горная выработка, цифровая модель рельефа, лазерное сканирование, облако точек, TIN-модель, ключевые точки рельефа.

METHODOLOGY FOR REFINING DIGITAL RELIEF MODELS OF OPEN-PIT MINE WORKINGS BASED ON LASER SCANNING AND AERIAL PHOTOGRAPHY

V.A. Valkov, E.O. Valkova, M.G. Mustafin

Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The article presents the results of research on the refinement of digital terrain models using point clouds obtained during lidar surveys or based on aerial photography from unmanned aircraft. It is established that when modeling various forms only on the basis of a set of key points, ambiguity may arise. It is determined that when using TIN models to clarify the position of the faces, it is advisable to use redundant points of the «ground» class. The variants of the implementation of approaches using the least squares method are shown. Their effectiveness and expediency are revealed on specific examples. The results of the research can be useful in work related to digital terrain modeling, including in relation to open-pit mining.

Keywords: digital relief model, open mining, laser scanning, point cloud, TIN model, key relief points.

Развитие маркшейдерско-геодезических работ на современном этапе сопровождается применением высокопроизводительных приборных средств и программного обеспечения (ПО). В последние годы существенно изменился вид выходной продукции при отображении рельефа и ситуации местности. Все более востребованным становится их представление в виде цифровых моделей, что позволяет наиболее реалистично изображать исследуемую территорию, а также решать различные актуальные задачи: контролировать геометрические параметры объектов съемки, получать цифровые топографические планы, создавать геоинформационные системы (ГИС), анализировать площади поверхностей и считать объемы, вести планирование дальнейших работ и т.д. [1-5].

Анализ геопространственных данных, из которых необходимо извлекать полезную информацию об объектах, таких, как открытые горные выработки, становится все более

необходимым по мере увеличения объема добычи полезных ископаемых [6-10]. Трехмерные модели объектов на сегодняшний день предоставляют информацию высокого качества, точности и детализации, которая необходима для решения проблем, связанных с уменьшением опасностей на карьерах, управлением ресурсами, разведкой полезных ископаемых, рассеиванием загрязняющих веществ и другими вопросами. Кроме того, современная нормативно-методическая документация регламентирует выполнение районирования открытых горных выработок по степени возникновения оползнеопасных процессов. Данная процедура также должна выполняться на основании актуальной трехмерной модели объекта [11-13].

С учетом постоянной эксплуатации карьера меняется и его геометрический облик, что тоже должно учитываться при моделировании. В связи с этим возникает необходимость использования систематических маркшейдерско-гео-

дезических измерений. При этом детально отслеживается развитие горных работ, что важно для решения вопросов эффективного планирования. Но больший вес имеет оценка безопасности условий ведения горных работ и зонирование горнотехнического объекта по степени опасности на предмет различного рода разрушений и, в первую очередь, оползневой опасности [14, 15].

На выбор метода съемки обычно влияют следующие критерии: оперативность сбора данных, точность измерений, возможность трехмерной визуализации, вариативность результатов, экономическая составляющая, простота камеральной обработки. Традиционно координаты характерных элементов горных выработок получают с помощью спутниковых определений и тахеометрическим методом. В то же время, в практику внедрены и более производительные технологии: наземное, мобильное и воздушное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка с беспилотных воздушных судов [16–19]. Их отличают достаточно высокая точность и плотностью данных, а также ярко выраженный модельно-ориентированный подход.

Структуры рельефа местности при традиционных (ручных) способах съемки фиксируются целенаправленно. Исполнитель не пропускает пикеты в местах перегибов, а на относительно ровных участках набирает их с плотностью, указанной в нормативно-технической документации. Облака точек по результатам лидарных съемок и АФС, наоборот, весьма избыточны, что нередко создает проблемы, как вычислительного, так и картографического характера [20–23].

Ключевым этапом обработки облаков точек при моделировании рельефа является классификация точек «земли» (ground) [24, 25]. Несмотря на то, что современное оснащение персональных компьютеров хоть и позволяет моделировать рельеф местности по всему набору соответствующих точек, это редко оправдано, так как наряду с затрачиваемыми ресурсами создает лишние неудобства при работе заинтересованного специалиста камеральной группы. Так, например, при использовании нерегулярных триангуляционных моделей число формирующих полигонов (граней) оказывается сильно избыточным, а изолинии, построенные по ним, весьма подробны и подлежат сглаживанию, что в автоматическом режиме не всегда приводит к желаемому результату [26–28]. По этой причине приходится применять «ручное» сглаживание результатов классификации точек класса «земля» в соответствии с требованиями генерализации рельефа местности для данного масштаба.

В силу того, что число точек «земли» весьма избыточно, для дальнейшей работы используют лишь «ключевые точки модели» (key points, model key points). Для их поиска задается допуск на расхождение между разными вариантами цифровой модели рельефа (по всем точкам земли и на основе подмножества). Его величина обычно соизмерима с точностью съемки либо назначается исходя из требований к точности итоговой модели. Обычно число «model key points» составляет менее 5% от начального множества точек. Пример их выделения на основе вертикального сечения по облаку точек проиллюстрирован на *рис. 1*.

В дальнейшем непосредственно по ключевым точкам создаются модели рельефа местности. Вместе с тем даже при использовании опции «model key points» в построенной мо-

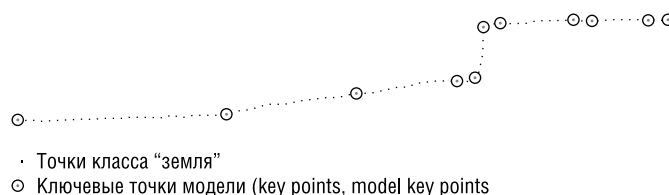


Рис. 1. Сечение по точкам рельефа с выделением ключевых точек /

Fig. 1. Section by relief points with the selection of key points.

дели возможны несоответствия с реальным рельефом местности или контурами заданной модели. Это возникает вследствие ряда причин. Главной из них является не достаточный контроль при построении различных границ структурных объектов модели и это довольно трудоемкая задача. В статье предлагается исследовать возможности уточнения ЦМР, построенных по ключевым точкам модели, с помощью всего множества точек класса «земля» (рассматривается рельеф местности и открытые горные выработки). Таким образом, обработка трехмерных данных по результатам лидарных съемок и АФС, а также эффективное и точное построение трехмерной модели представляют собой актуальную научно-производственную задачу.

Целью исследования является разработка подходов, позволяющих после триангуляции Делоне выполнять уточнение структуры трёхмерных граней по методу наименьших квадратов и избыточных данных (точек класса «земля», не вошедших в множество ключевых точек). Для реализации данного подхода задействуются положения аналитической геометрии в части применения барицентрических координат и нахождения расстояний от точки до плоскости в пространстве.

Методы и материалы

На сегодняшний день триангуляционная нерегулярная сеть (TIN) является наиболее популярным методом представления исследуемых объектов. TIN-модель представляет собой мозаичную сеть неперекрывающихся треугольников, каждый из которых состоит из неравномерно распределенных точек с известными прямоугольными координатами. Существуют различные сети триангуляции, но чаще всего при создании трехмерных моделей рельефа используется триангуляция Делоне [29]. Метод подходит для глобального моделирования объектов, он дает согласованное трехмерное объемное разделение пространства в соответствии с полученной информацией по данным многоточечных измерений.

Производственная методика создания ЦМР по облакам точек основана на автоматическом построении триангуляции Делоне на основе ключевых точек модели. На этом этапе дискретные точки преобразуются в непрерывную поверхность, вследствие чего могут возникать ошибки и неточности. Обычно далее ЦМР редактируется в ручном режиме: часть вершин и ребер удаляется, включаются выделенные структурные линии, переставляются местами ребра соседних треугольников и т.д.

В качестве примера рассмотрим созданную искусственно модель в виде геологической депрессии (*рис. 2*).

Допустим, что на поверхность попало несколько десятков (а в реальности — сотен или тысяч) точек, из которых в ключевые вошло всего 10 (*рис. 3, рис. 4*).

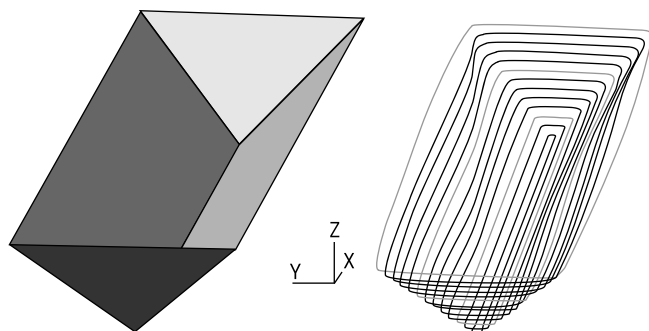


Рис. 2. Модель депрессии в виде поверхностной модели и набора изолиний /

Fig. 2. A model of a geological depression in the form of a surface model and a set of isolines.

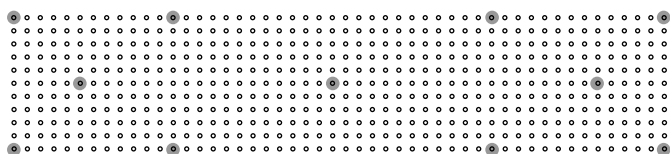


Рис. 3. Точки на поверхности геологической депрессии при виде сверху /

Fig. 3. Points on the surface of the geological depression in top view.

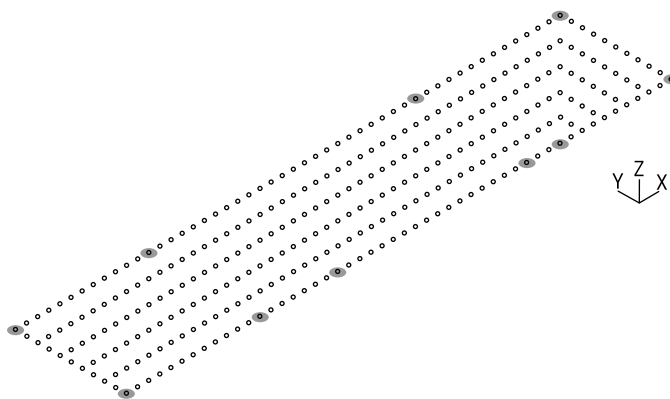


Рис. 4. Точки на поверхности геологической депрессии в изометрии /

Fig. 4. Points on the surface of the geological depression in isometry.

По ключевым точкам в автоматическом режиме в программе Autodesk AutoCAD Civil 3D 2020 построена триангуляция Делоне (рис. 5).

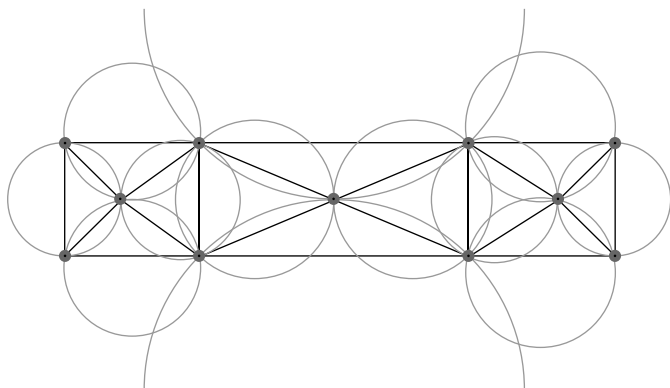


Рис. 5. Триангуляция Делоне по ключевым точкам при виде сверху /

Fig. 5. Delaunay triangulation by key points in top view.

На рис. 5 видно, что поверхность удовлетворяет условию Делоне, а именно, внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции. Но данное представление не удовлетворяет форме объекта (рис. 6).

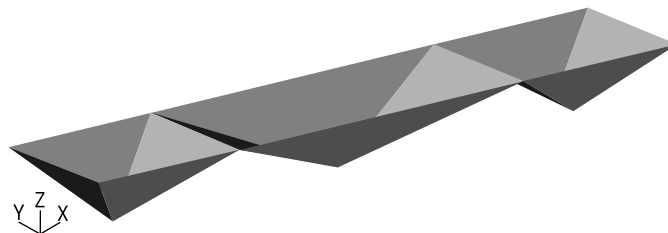


Рис. 6. Результат построения триангуляции по ключевым точкам в изометрии /

Fig. 6. Result of triangulation by key points in isometry.

При соблюдении условия Делоне наблюдается стремление к равносторонним треугольникам, поэтому ребра могут проходить под большими углами к структурным линиям рельефа. Автоматический этап моделирования не учитывает избыточные данные, то есть все точки «земли», не попавшие в подмножество ключевых (рис. 7).

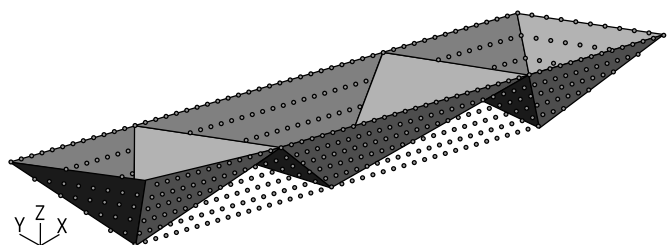


Рис. 7. Несоответствие поверхности по ключевым точкам всем точкам класса «земля» /

Fig. 7. The discrepancy of the surface by key points to all points of the «ground» class.

Необходимо внести редакционные действия и переставить несколько ребер (рис. 8).

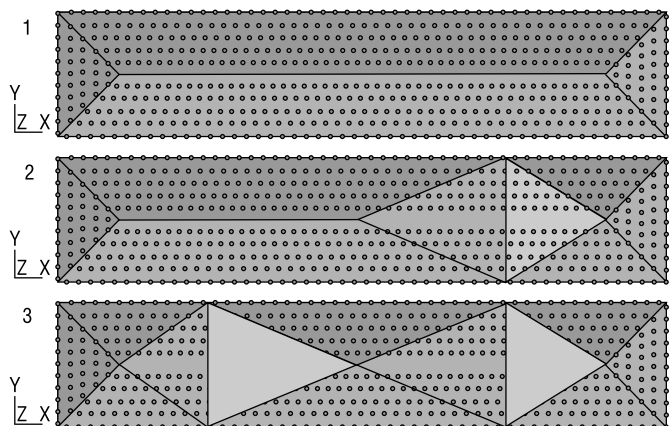


Рис. 8. Редактирование поверхности путем последовательной перестановки ребер: 1 - полная редакция; 2 - частичная редакция; 3 - без исправления /

Fig. 8. Editing a surface by sequentially rearranging edges: 1 - full revision; 2 - partial revision; 3 - without correction.

Аналогичные неоднозначности, требующие исправления, можно часто встретить и на открытых горных выработках. Примеры облаков точек лазерных отражений (ТЛО) классов «земля» и «ключевые точки модели» карьера показаны на рис. 9.

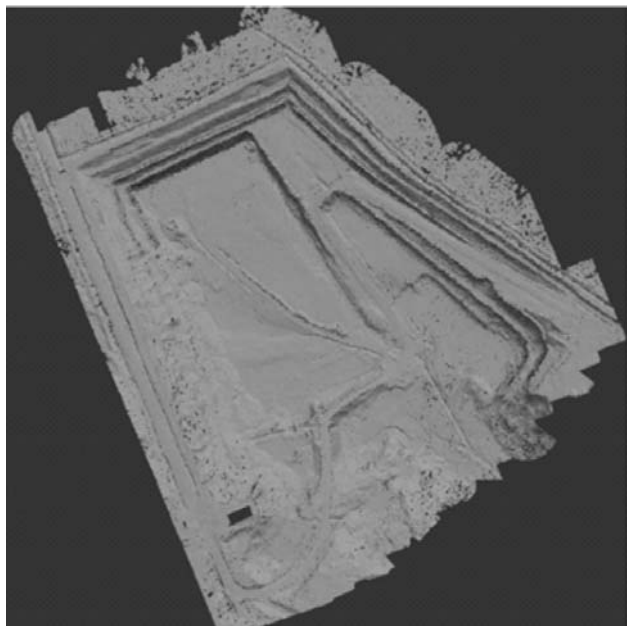


Рис. 9. Примеры облаков точек классов «земля» и «ключевые точки модели» карьера /

Fig. 9. Examples of point clouds of the «ground» and «key points» classes of open-pit.

После создания ЦМР визуально выявлено несколько десятков ошибок, как на бортах, так и на дне карьера. Они выделены красным цветом на рис. 10.

Подробнее рассмотрим одну из них. Раскраска ТЛО по вектору нормали и фрагмент ортофотоплана по материалам АФС подтверждают необходимость перестановки ребра внутри выделенного контура (рис. 11). Варианты до и после редактирования в изометрии представлены на рис. 12.

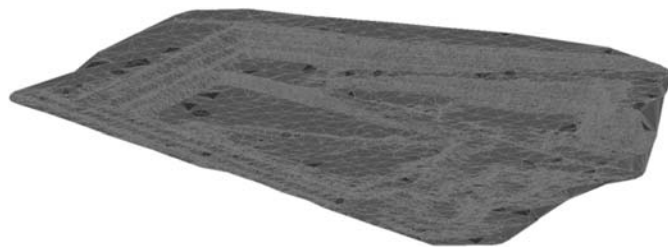


Рис. 10. Модель карьера по ключевым точкам модели /

Fig. 10. Open-pit model by key points of the model.

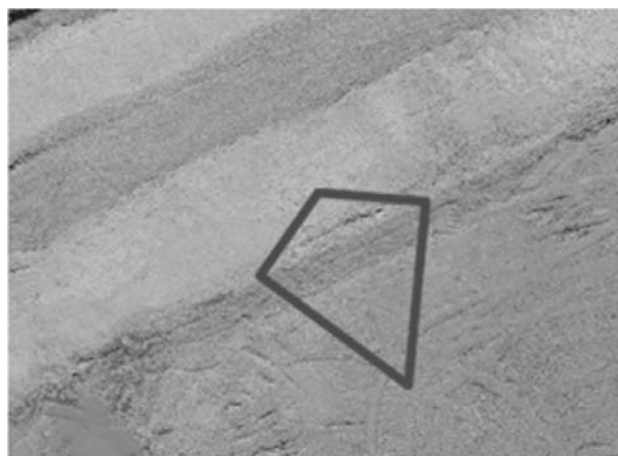
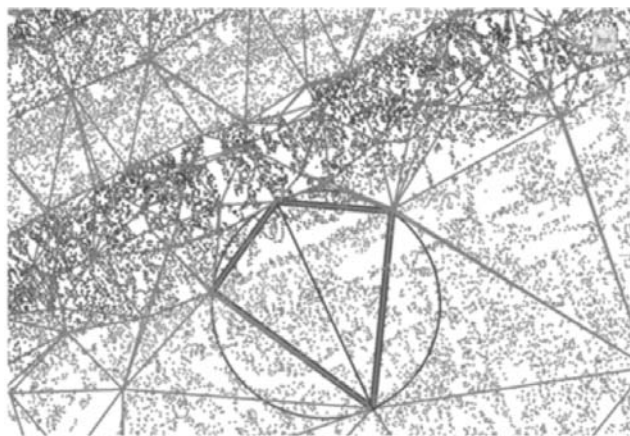


Рис. 11. Неточность моделирования фрагмента борта карьера по триангуляции Делоне /

Fig. 11. Inaccuracy of modeling a fragment of a open-pit side by Delaunay triangulation.

Конечно, двойственность построения может быть учтена при ручном редактировании. Но с увеличением масштаба задачи до тысяч и миллионов точек, безусловно, нужны более эффективные подходы для корректного построения цифровой модели. Ручная работа оператора по перестановке ребер в таком случае потребует много времени. Очевидно, что исправить абсолютно все треугольники очень сложно.

Нам представляется своевременным сформулировать предпосылки к оптимизации данного этапа и устранению неоднозначностей. Для этого можно использовать метод уточнения триангуляции по методу наименьших квадратов.

Задача сводится к определению высот точек класса «земля» (z) в проекции для треугольников до и после перестановки.

новки ребер, после чего данные значения сравниваются с начальными. Определить z в этом случае можно через барицентрические координаты (α, β, γ) , равные отношению площадей треугольников (рис. 13).

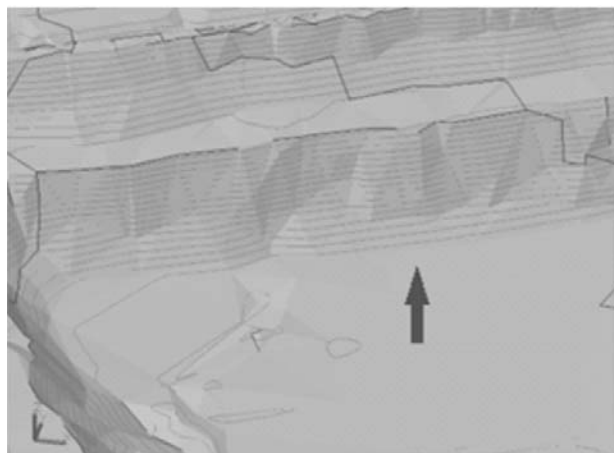
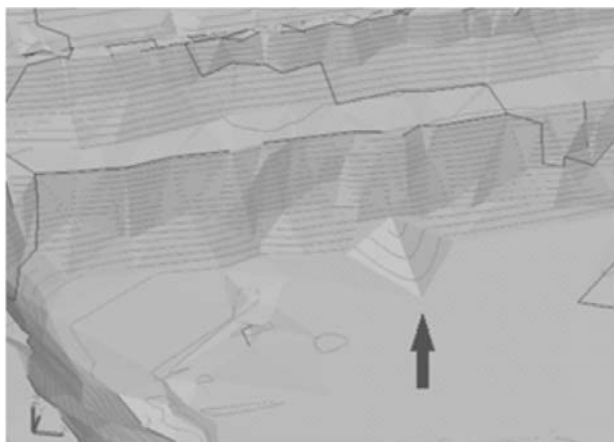


Рис. 12. Исправление ЦМР фрагмента борта карьера /
Fig. 12. Correction of the DEM fragment of the side of an open-pit.

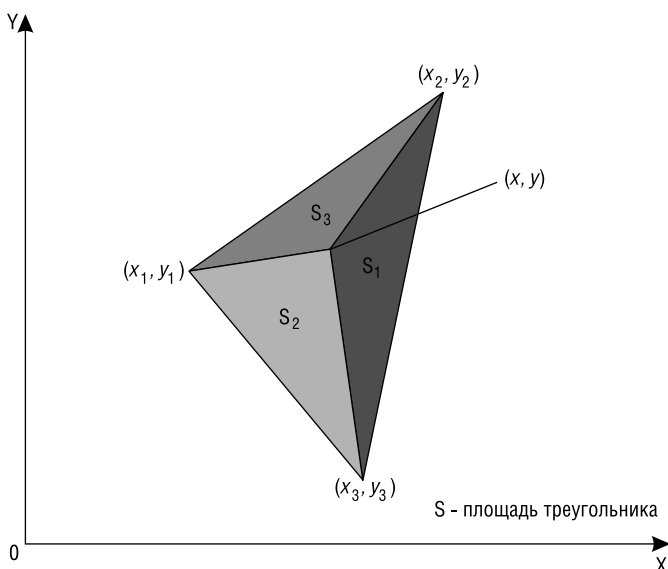


Рис. 13. Геометрический смысл барицентрических координат /
Fig. 13. Geometric meaning of barycentric coordinates.

$$\alpha = \frac{S_1}{S}; \quad (1)$$

$$\beta = \frac{S_2}{S}; \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{S_3}{S}; \quad (3)$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3; \quad (4)$$

где (α, β, γ) – барицентрические координаты, S_1, S_2, S_3 – площади треугольников.

Эти числа неотрицательны и удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} \alpha + \beta + \gamma &= 1 \\ \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 &= x \\ \alpha y_1 + \beta y_2 + \gamma y_3 &= y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $(x_1, y_1); (x_2, y_2); (x_3, y_3)$ – плановые координаты вершин треугольника.

Тогда определитель этой системы уравнений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix} = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1); \quad (6)$$

По формулам Крамера решение составит:

$$\alpha = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \beta = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \gamma = 1 - \alpha - \beta; \quad (7)$$

где

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x & x_2 & x_3 \\ y & y_2 & y_3 \end{vmatrix} = (x_2 y_3 - x_3 y_2) + x(y_2 - y_3) + y(x_3 - x_2); \quad (8)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x & x_3 \\ y_1 & y & y_3 \end{vmatrix} = (x_3 y_1 - x_1 y_3) + x(y_3 - y_1) + y(x_1 - x_3); \quad (9)$$

Таким образом, если известны координаты точки (x, y) , а также высоты вершин рассматриваемого треугольника z_1, z_2, z_3 , значение высоты в ней рассчитывается по формуле:

$$z = \alpha z_1 + \beta z_2 + \gamma z_3; \quad (10)$$

По данному сценарию можно определять высоты точек класса «земля» в проекции для всех соседних треугольников, а затем в проекции для новых треугольников с учетом перестановки общего ребра. Сравнение высот точек «земли» с высотами в проекции для двух предварительных решений позволит получить отклонения dz для каждой точки. В дальнейшем нужно использовать тот случай, в котором $\sum dz^2$ минимальна, а также выполнить повторную проверку соседних треугольников.

Подход на основе барицентрических координат может быть удобен, так как реализован в профильном программном обеспечении. Так функции переноса блоков к поверхности и добавления новых точек на основе существующей триангуляции можно встретить, например, в программе Autodesk AutoCAD Civil 3D. Если реализовывать приложение для уточнения ЦМР на ее базе, можно воспользоваться готовым решением или его модернизировать.

Вместе с тем, вместо определения отклонений dz можно апеллировать и кратчайшими расстояниями до плоскости, используя известные положения об уравнении плоскости и формулу Герона.

Как известно, уравнение плоскости, проходящей через три точки с известными координатами, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z - z_1 & z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0; \quad (11)$$

где $(x_1, y_1); (x_2, y_2); (x_3, y_3)$ — координаты точек, через которые проходит данная плоскость, а $(x; y; z)$ — всевозможные координаты точек этой плоскости.

Уравнение плоскости имеет вид:

$$Ax + By + Cz + D = 0; \quad (12)$$

где A, B, C, D — коэффициенты, задающие плоскость.

Применяя формулу Герона, кратчайшее расстояние от произвольной точки до плоскости:

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}; \quad (13)$$

где $(x_0; y_0; z_0)$ — координаты точки.

Дальнейшая последовательность проверки при использовании отклонений от плоскости останется аналогичной, описанной выше.

На основе предложенного алгоритма проведены тестовые расчеты, которые показали его эффективность. К примеру, решение задачи о моделировании депрессии с учетом метода наименьших квадратов исключило ручное корректирование модели и позволило сразу получить желаемый результат (см. рис. 8, 3). Представляется, что дополнительно можно анализировать число вершин триангуляции и обработанных треугольников, плотность уточняющих точек на треугольнике, количество перестроений, длины ребер, максимальное уклонение и СКО.

Заключение

Современные маркшейдерско-геодезические работы все более интегрируются с компьютерными технологиями. Процесс съёмки и предварительной обработки данных лазерного сканирования и АФС практически полностью автоматизирован. Вместе с тем при построении модели объекта значи-

тельный объем работ еще выполняется оператором вручную. К нему можно отнести такие работы, как векторизация ортофотопланов и редактирование цифровой модели рельефа. Приходится работать с огромным количеством неструктурированных данных. Специалист, создавая топографический план или модель затрачивает много времени, что, конечно, снижает производительность. Здесь следует отметить, что одна только съёмка с воздуха не может дать исчерпывающей информации для составления ЦТП. Обычно используются пикеты наземной съёмки, материалы дешифрирования и справочные данные. Поэтому чрезвычайно важно развитие модулей автоматизированного проектирования.

Рассмотренный в статье подход позволяет упростить и ускорить работу по моделированию различных объектов, в том числе открытых горных выработок. Как было отмечено модельный подход обеспечивает повышение качества не только производственных решений в вопросах проектирования горных работ, но что более важное создает основу для геодезического мониторинга. При этом уточненная модель используется и при конечно-элементном анализе деформированного состояния (например, борта карьера), что является составной частью мониторинга и также непосредственно при оценке деформаций по результатам наблюдений.

Описана общая идея работы, которая состоит в уточнении структуры треугольников ЦМР по методу наименьших квадратов с использованием избыточных данных, а именно точек «земли», не вошедших в множество ключевых точек. На тестовых примерах показана эффективность предложенного подхода.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований по уточнению цифровых моделей рельефа с помощью точечных моделей, получаемых передовыми маркшейдерско-геодезическими методами съёмки.

2. Предлагаемые подходы представляются перспективными для реализации и требуют незначительного вмешательства оператора, что ценно при обработке значительных массивов геопространственной информации (точечных моделей). Для иллюстрации их работы были выбраны тестовые наборы данных как для природных, так и техногенных объектов, таких как открытые горные выработки.

3. Результаты исследования могут эффективно применяться заинтересованным специалистом, а также совершенствоваться в соответствии с развитием компьютерных технологий. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Боярчук М.А., Журкин И.Г., Непоклонов В.Б., Орлов П.Ю., Анализ геоинформационных технологий в целях изучения визуализации и отображения вертикальных и горизонтальных деформаций поверхности Земли // Геодезия и картография. - 2022. - № 10. - С. 53-61. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-10-53-61
2. Курков В. М., Перес Вальдес Мануэль де Хесус, Бляхарский Д. П. Создание трехмерных моделей объектов памятников исторического и культурного наследия с использованием беспилотных летательных аппаратов самолетного и мультироторного типов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2016. - Т. 60. - № 2. - С. 94-99.
3. Kuzin A.A., Kovshov S.V. Accuracy evaluation of terrain digital models for landslide slopes based on aerial laser scanning results // Ecology, Environment and Conservation. 2017. No. 249(5). Pp. 908-914.
4. Мустафин М.Г., Васильев Б.Ю., Глазунов В.В. Развитие методов построения цифровой модели рельефа по данным многоточечных маркшейдерско-геодезических измерений // Маркшейдерский вестник - 2022. - №2. - С. 33.
5. Пупоревич А.А., Выстрчил М.Г., Апарин А.Г. Исследование точности автоматического визирования роботизированным тахеометром на коротких расстояниях // Маркшейдерия и Недропользование. - 2022. - №2. - С. 41.

6. Pavlovich A.A. and others. Estimation of Rock Mass Strength in Open-Pit Mining // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 1. No. 239. Pp. 502-509. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.502
7. Protosenya A.G., Verbilo P.E. Research of compression strength of fissured rock mass // Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 223. P. 51. DOI:10.18454/pmi.2017.1.51
8. Волошина Е.А., Деменков П.А., Киреева В.И. Методика расчета численности маркшейдерской службы на песчаном карьере // Маркшейдерия и недропользование. - 2023. - №1. - с. 64.
9. Wang J. et al. Construction and optimization method of the open-pit mine DEM based on the oblique photogrammetry generated DSM // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107322.
10. Denis V. Potekhin, Sergei V. Galkin. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the Permo-Carboniferous oil deposit of the Usinskoye field // Journal of Mining Institute. 2023. Vol 259. Pp. 41-51. DOI: 10.31897/PMI.2022.101
11. Riquelme AJ, Abellan A, Tomas R. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. Engineering Geology. 2015. No. 195. Pp. 185 - 195. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.06.009
12. Alexander A. Baryakh, Sergey Yu. Devyatkov, Eduard T. Denkevich. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by long-wall faces // Journal of Mining Institute. 2023. Vol 259. Pp. 13-20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11
13. Temkin I.; Myaskov A.; Deryabin S.; Konov I.; Ivannikov A. Designing a digital 3D model of the transport and technological environment of quarries based on the general use of telemetric and geospatial information // Sensors. 2021. 21(18):6277. DOI:10.3390/s21186277
14. Новоженин С.Ю., Митусова Н.М. Оценка устойчивости бортов карьеров, отвалов горных пород на основе метода математического моделирования с использованием программного комплекса «PLAXIS 3D» // Маркшейдерский вестник - 2022. - №1. - С. 33.
15. Павлова А.И. Применение методов цифрового моделирования рельефа для картографирования эрозионных земель // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2016. - № 2 (74). - С. 159-169.
16. Blishchenko A.A., Sannikova A.P. Analysis of the possibility of surveying the forest fund using UAVs // Vestnik SSUGT. 2022. No. 1. Vol.27. Pp. 42-51. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51
17. Зицик А.А., Боголюбова А.А., Романчиков А.Ю. Прикладное использование фотограмметрического метода получения данных о натурных измерениях при проведении обмеров нежилого помещения // Инженерные системы и городское хозяйство. - 2020. - С. 160-169.
18. Sayab M, Aerden D, Paananen M, Saarela P. Virtual structural analysis of Jokisivu open pit using «structure-from-motion» Unmanned Aerial Vehicles (UAV) photogrammetry: Implications for structurally-controlled gold deposits in Southwest Finland. Remote Sens. 2018. DOI:10.3390/rs10081296
19. Хлебникова Т.А., Ямбаев Х.К., Опритова О.А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства // Вестник СГУГиТ. - 2020. С. 106-118. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118
20. Badenko V., Fedotov A., Vinogradov K. Algorithms of Laser Scanner Data Processing for Ground Surface Reconstruction // Journal of Physics: Conference Series.: IOP Publishing Ltd. 2018. Pp. 397-411. DOI:10.1007/978-3-319-95165-2_28
21. Kopylova N.S., Starikov I.P. Fresh approaches to Earth surface modeling // Journal of Physics: Conference Series.: Institute of Physics Publishing. 2018 Ser. 1050. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032062
22. Zhang T., Xu X., Xu S. Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation // Measurement. 2015. Vol. 63. P. 287-298
23. Kochneva A.A., Vinogradov E.A., Sankovsky A.A. Study of Laser Scanning Data Redundancy for Constructing Digital Simulation of Terrain // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. No. 238. pp. 5445-5455.
24. Chen J., Chen Y., Liu Z. Classification of typical tree species in laser point cloud based on deep learning // Remote Sensing. 2021. 13(23). DOI:10.3390/rs13234750
25. Deschaud J. E. et al. Paris-carla-3d: A real and synthetic outdoor point cloud dataset for challenging tasks in 3d mapping // Remote Sensing. 2021 13(22). DOI:10.3390/rs13224713
26. Шарафутдинова А.А., Брынь М.Я. Требования к точности наземного лазерного сканирования для решения инженерно-геодезических задач с помощью цифрового информационного моделирования // Геодезия и картография. - 2021. - № 8. - С. 2-12. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-974-8-2-12
27. Коледа С.А. Технология информационного моделирования (BIM) в КРЕДО // Геопрофи. - 2019. - № 1. - С. 20-23.
28. Абрамова А.С. Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа дна океанов на примере участков покрытия многолучевой съемкой Норвежского и Баренцева морей // Геодезия и картография. - 2021. - № 1. - С. 13-22. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-13-22
29. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. - 128 с.

REFERENCES

1. Boyarchuk M.A., Zhurkin I.G., Nepoklonov V.B., Orlov P.Yu. Geoinformational technologies analysis for studying the visualization of the Earth's surface vertical and horizontal deformations // Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografia. 2020. 83(10), pp. 53-61. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-10-53-61
2. Kurkov V. M., Peres Val'dez Manuel' de Khesus, Blyakharskii D. P. Creation of three-dimensional models of historical and cultural heritage sites using unmanned aerial vehicles of aircraft and multirotor types // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"emka. 2016. 60 (2), pp. 94-99.
3. Kuzin A.A., Kovshov S.V. Accuracy evaluation of terrain digital models for landslide slopes based on aerial laser scanning results // Ecology, Environment and Conservation. 2017. No. 249(5). Pp. 908-914.

4. Mustafin M. G., Vasiliev B. Yu., Glazunov V. V. Development of Methods of Digital Elevation Model Generation Based on the Data of Multi-point Surveying and Geodetic Measurements // *Mine Surveying Bulletin*. 2022. 2, P. 33.
5. Puporevich A., Vystrchil M., Aparin A. Research of accuracy of automatic targeting by robotic total station at short distances // *Mine surveying and subsurface use*. 2022. 2, P. 41.
6. Pavlovich A.A. and others. Estimation of Rock Mass Strength in Open-Pit Mining // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 1. No. 239. Pp. 502-509. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.502
7. Protosenya A.G., Verbilo P.E. Research of compression strength of fissured rock mass // *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 223. P. 51. DOI:10.18454/pmi.2017.1.51
8. Voloshina E.A., Demenkov P.A., Kireeva V.I. The number of mine surveying service estimation at a sand pit // *Mine surveying and subsurface use*. 2023. 1, P. 64.
9. Wang J. et al. Construction and optimization method of the open-pit mine DEM based on the oblique photogrammetry generated DSM // *Measurement*. 2020. Vol. 152. P. 107322.
10. Denis V. Potekhin, Sergei V. Galkin. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the Permo-Carboniferous oil deposit of the Usinskoye field // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol 259. Pp. 41-51. DOI: 10.31897/PMI.2022.101
11. Riquelme AJ, Abellan A, Tomas R. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*. 2015. No. 195. Pp. 185 - 195. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.06.009
12. Alexander A. Baryakh, Sergey Yu. Devyatkov, Eduard T. Denkevich. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by long-wall faces // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol 259. Pp. 13-20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11
13. Temkin I.; Myaskov A.; Deryabin S.; Konov I.; Ivannikov A. Designing a digital 3D model of the transport and technological environment of quarries based on the general use of telemetric and geospatial information // *Sensors*. 2021. 21(18):6277. DOI:10.3390/s21186277
14. Novozhenin S.Yu., Mitusova N.M. Stability assessment of the pit walls and dumps based on the method of mathematical modeling using the «Plaxis 3D» software // *Mine Surveying Bulletin*. 2022. 1, P. 33.
15. Pavlova A.I. The Application of digital modeling of relief for an assessment of erosive danger of lands // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2016. 2(74), pp. 159 -169.
16. Blishchenko A.A., Sannikova A.P. Analysis of the possibility of surveying the forest fund using UAVs // *Vestnik SSUGT*. 2022. No. 1. Vol.27. Pp. 42-51. DOI:10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51
17. Zitsik A. A., Bogoliubova A. A., Romanchikov A. Yu. Application of the photogrammetric method for obtaining data on full-scale measurements during measurements of non-residential premises // *Engineering systems and urban economy*. 2020. Pp. 160-169.
18. Sayab M, Aerden D, Paananen M, Saarela P. Virtual structural analysis of Jokisivu open pit using «structure-from-motion» Unmanned Aerial Vehicles (UAV) photogrammetry: Implications for structurally-controlled gold deposits in Southwest Finland. *Remote Sens*. 2018. DOI:10.3390/rs10081296
19. Khlebnikova T.A., Yambaev Kh.K., Opritova O.A. Development of a technological scheme for collecting and processing aerial photography data using unmanned aircraft systems for modeling geospaces // *Vestnik SSUGT*. 2020. 25(1), pp. 106-118.
20. Badenko V., Fedotov A., Vinogradov K. Algorithms of Laser Scanner Data Processing for Ground Surface Reconstruction // *Journal of Physics: Conference Series*.: IOP Publishing Ltd. 2018. Pp. 397-411. DOI:10.1007/978-3-319-95165-2_28
21. Kopylova N. S., Starikov I. P. Fresh approaches to Earth surface modeling // *Journal of Physics: Conference Series*.: Institute of Physics Publishing. 2018 Ser. 1050. DOI:10.1088/1742-6596/1015/3/032062
22. Zhang T., Xu X., Xu S. Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation // *Measurement*. 2015. Vol. 63. P. 287-298
23. Kochneva A.A., Vinogradov E.A., Sankovsky A.A. Study of Laser Scanning Data Redundancy for Constructing Digital Simulation of Terrain // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. No. 238. pp. 5445-5455.
24. Chen J., Chen Y., Liu Z. Classification of typical tree species in laser point cloud based on deep learning // *Remote Sensing*. 2021. 13(23). DOI:10.3390/rs13234750
25. Deschaud J. E. et al. Paris-carla-3d: A real and synthetic outdoor point cloud dataset for challenging tasks in 3d mapping // *Remote Sensing*. 2021 13(22). DOI:10.3390/rs13224713
26. Sharafutdinova A.A., Bryn M.Ya. On the accuracy requirements of terrestrial laser scanning for solving engineering and geodetic tasks using BIM // *Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografia*. 2021. 82(8), pp. 2-12. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-974-8-2-12
27. Koleda C.A. Tekhnologiya informatsionnogo modelirovaniya (BIM) v KREDO. *Geoprofi*. 2019. 1, pp. 20-23.
28. Abramova A.S. Accuracy assessment of publicly available digital elevation models of the ocean floor, at the polygons of multibeam data coverage in the Norwegian and Barents Seas // *Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografia*. 2021. 82(1), pp. 13-22. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-13-22
29. Skvortsov A.V. *Triangulyatsiya Delone i eye primeneniye*. - Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta. 2002. - 128 s.

БЛАГОДАРНОСТИ / ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ / ACKNOWLEDGMENTS.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО «НПП «БЕНТА» в лице заместителя генерального директора, к.т.н. К.П. Виноградова и главного специалиста, к.т.н. А.И. Науменко за ценные рекомендации при планировании исследования / The authors express gratitude to the employees of NPP BENTA LLC represented by Deputy General Director, Ph.D. K.P. Vinogradov and Chief Specialist, Ph.D. A.I. Naumenko for valuable recommendations when planning the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Вальков Вячеслав Александрович:
кандидат технических наук,
доцент кафедры Инженерной геодезии,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: valkov_va@pers.spmi.ru,
РИНЦ Author ID: 904064,
Scopus Author ID: 57194544768



Валькова Евгения Олеговна:
аспирант,
кафедра Маркшейдерского дела,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: i@evedernikova.ru,
РИНЦ Author ID: 1158284,
Scopus Author ID: 58069338400



Мустафин Мурат Газизович :
доктор технических наук;
заведующий кафедрой Инженерной геодезии,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: mustafin_m@mail.ru,
РИНЦ Author ID: 131452,
Scopus Author ID: 56996017000

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valkov Vyacheslav:
Ph.D.,
Associate Professor of Engineering Geodesy,
Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia,
e-mail: valkov_va@pers.spmi.ru,
RSCI Author ID: 904064,
Scopus Author ID: 57194544768

Valkova Evgeniia:
post-graduate student,
Department of Mining Surveying,
Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia,
e-mail: i@evedernikova.ru,
RSCI Author ID: 1158284,
Scopus Author ID: 58069338400

Mustafin Murat:
Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Engineering Geodesy,
Saint Petersburg Mining University,
Saint Petersburg, Russia,
e-mail: mustafin_m@mail.ru,
RSCI Author ID: 131452,
Scopus Author ID: 56996017000

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.



РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Факультет Инженерная академия специальность **Геология**

Целью обучения является подготовка квалифицированных специалистов в области геологии, способных разрабатывать инновационные методы решения производственных задач в области поиска и разведки месторождений нефти, газа и твердых полезных ископаемых.

Во время обучения студенты получают знания, формируют навыки и умения в области анализа современного состояния и актуальных проблем геологической науки, поиска и изучения геологической, геофизической, геохимической информации и космических снимков, применения методов комплексных геолого-геофизических исследований, создания трехмерных геологических моделей, приобретают опыт самостоятельной научно-исследовательской, прикладной и педагогической работы. Задачи обучения направлены на привитие навыков ориентирования в аналоговых и цифровых геологических данных, формирование представлений о назначении инновационных методов геолого-геофизических исследований и обработки информации, развитие навыков применения инновационных методов прогноза месторождений полезных ископаемых и ориентирования в специализированных программах при эффективном использовании их возможностей.

Контакты : 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. Приемная комиссия (Граждане РФ) +7 (495) 433-95-88, +7 (495) 787-38-27 доп.: 1214. E-mail: priem@rudn.ru. КОНТАКТ-ЦЕНТР: +7 (499) 936-87-87. E-mail: information@rudn.ru



WWW.N-GN.RU