

УДК [004.925.83+528.06]:504  
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-5-15

## Создание пространственной модели рельефа местности по результатам геодезических измерений для анализа воздействия на окружающую среду в условиях малых карьеров

*А. А. Басаргин<sup>1</sup>\**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: abaspirant@mail.ru

**Аннотация.** Добыча полезных ископаемых, особенно открытым способом, оказывает значительное воздействие на рельеф местности. В статье рассматривается использование геодезических методов для наблюдения за процессом добычи полезных ископаемых и его возможным воздействием на окружающую среду. Созданная модель рельефа может быть использована для проектирования процесса восстановления карьера после их закрытия. Минеральные богатства страны считаются важным фактором и связаны с экономикой страны. Минеральные ресурсы являются невозобновляемыми, и их добыча и последующая переработка должны учитывать редкость их залегания, уровень технологий добычи для отслеживания пространственных изменений в горных работах. Основная идея данного научного исследования заключается в применении геодезических методов измерений для определения текущих масштабов добычи в карьере с помощью 3D-модели рельефа местности. В работе представлен обзор используемых технологий при выполнении геодезических измерений, а также обработке измеренных данных для оценки состояния пространственного распределения карьера с целью определения влияния добычи полезных ископаемых на ландшафт. Целью данной статьи является создание пространственной модели рельефа местности по результатам геодезических измерений для анализа воздействия на окружающую среду в условиях малых карьеров. Для создания пространственной модели рельефа местности были использованы методы геодезических наблюдений. Также были созданы цифровые карты путем фотограмметрической обработки аэростереоизображений и последующего полуавтоматического удаления растительности и других объектов.

**Ключевые слова:** геодезические измерения, процесс добычи ископаемых, карьер, 3D-модель, определение объема, температура поверхности земли, NDVI

### *Введение*

Горнодобывающая компания обязана осуществлять постоянный контроль текущего состояния месторождений путем ведения маркшейдерской документации о состоянии и ходе добычи, а также количестве запасов и их инвентаризации. Это необходимо, чтобы минимизировать негативное воздействие горных работ на окружающую среду. Создавая прогностические модели распространения за-

грязняющих веществ, можно уменьшить неблагоприятное воздействие горнодобывающей деятельности на карьерах [1]. Добычу полезных ископаемых при открытых горных работах можно разделить на несколько этапов, которые связаны между собой и составляют так называемый жизненный цикл карьера.

Важной частью первой фазы разведки является классификация запасов на экономические запасы (могут быть извлечены сейчас) и потенциально промышленные запасы (в настоящее

время не могут быть эффективно извлечены). На втором этапе организация обязана составить план по предотвращению, снижению и устранению нагрузки на окружающую среду, возникающей в результате предлагаемых процедур добычи и способа вскрытия месторождения. Процедура оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) также является частью предложения по добыче полезных ископаемых [2]. Третий этап – это строительство инфраструктуры карьера для добычи полезных ископаемых. Также может быть включена деятельность по переработке полезных ископаемых. Четвертая фаза представляет собой фактическую добычу минералов и их возможную добычу и переработку. В целом эта фаза может представлять собой самый продолжительный период.

После прекращения добычи из-за дефицита полезных ископаемых или других неблагоприятных обстоятельств (снижение потребности в сырье, финансовые трудности и др.) следует этап закрытия карьера и рекультивации нарушенной природной среды.

Документация геопространственного распределения карьера путем применения выбранных геодезических методов, технологий и программного обеспечения – это способ постоянного контроля пространственных изменений в горных работах, так как ограниченный доступ к пространственной информации может привести к неправильным решениям [3–7].

Инновации измерительных технологий и программного обеспечения для обработки данных облегчают геодезическую работу на карьере, независимо от того, собираются ли они, обрабатываются или анализируются.

Одним из типичных примеров является геодезическая съемка поверхности карьера и последующее определение извлекаемого объема между двумя периодами времени.

В результате это позволит создать 3D-модель карьера по результатам маркшейдерских измерений, проведенных в два временных интервала, для определения объема добываемых полезных ископаемых [8].

В будущем на основе полученной модели можно будет производить пересмотр прогнозов и переклассификацию запасов полезных ископаемых. При этом отправной точкой мо-

жет быть база геоданных, содержащая карты полезных ископаемых и охраняемых территорий, чтобы помочь в выявлении потенциальных интересов при стратегическом планировании конкретных типов горнодобывающих проектов.

### *Методы и материалы*

Карьер «Куртова скала» в Якловце находится в Кошицком районе (рис. 1). Начало добычи полезных ископаемых в карьере приходится на 70–80-е гг. XX в. Район исследования расположен на северо-востоке Словацких Рудных гор в Воловецких горах. Твердая залежь расположена на высоте 710–753 м над уровнем моря в Балтийской системе высот и ориентирована на юго-запад. Подъезд к карьере осуществляется по асфальтированной дороге от села Маргечаны [9].

Между периодами измерений разница составляла 1 414 дней, в течение которых был добыт определенный объем полезных ископаемых. Во время рекогносцировки интересующего района соответствующим образом были спроектированы геодезические точки. Измерительные работы проводились по принципу обобщения. Было важно измерить характерные точки гребней и изломов карьера [10–12].

В результате маркшейдерских работ были получены координаты измеренных точек карьера. Расположение точек рельефа второго периода показано на рис. 2.

В общей сложности 1 961 точка была измерена с помощью тахеометра Leica Viva TS15I и 190 точек, измеренных с помощью GNSS-приемника Leica GPS900CS. Они использовались для создания двух моделей открытого карьера и расчета извлеченного объема доломитового известняка.

Данные, измеренные GNSS-приемником Leica GPS900CS, были обработаны в Leica-GeoOffice, а затем экспортированы в текстовый файл. Измеренные данные также экспортировались в текстовые файлы из TS Leica Viva TS15I. Текстовые файлы формата \*.txt содержали номера точек и их координаты. Измеренные точки из двух периодов измерения карьера были импортированы в Microstation V8i

с надстройкой Terramodeler в виде двух поверхностей. Кроме этого, 3-я поверхность была создана из координат облака точек, сгег-

нерированного в результате обработки аэрофотоснимков. Все три рельефа были импортированы как точки изломов и рельефа [10].

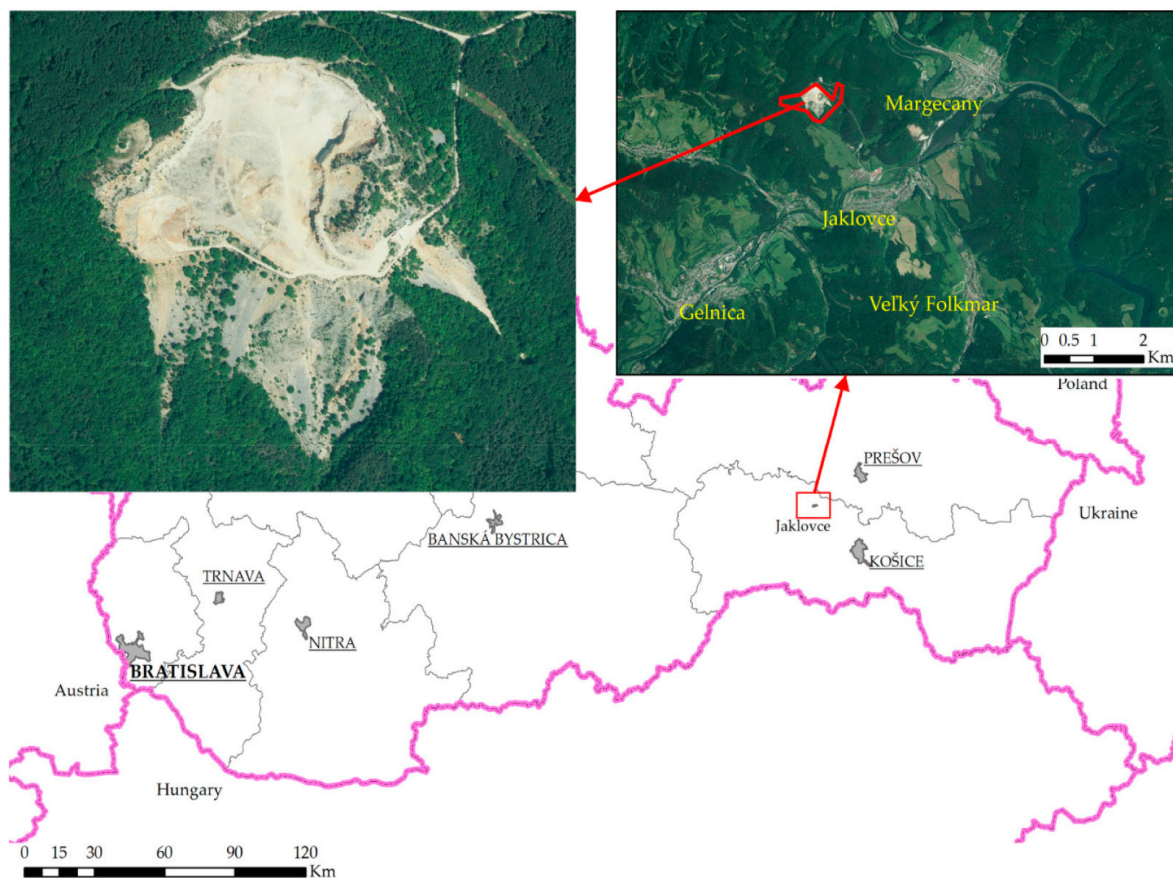


Рис. 1. Район карьера «Куртова скала»

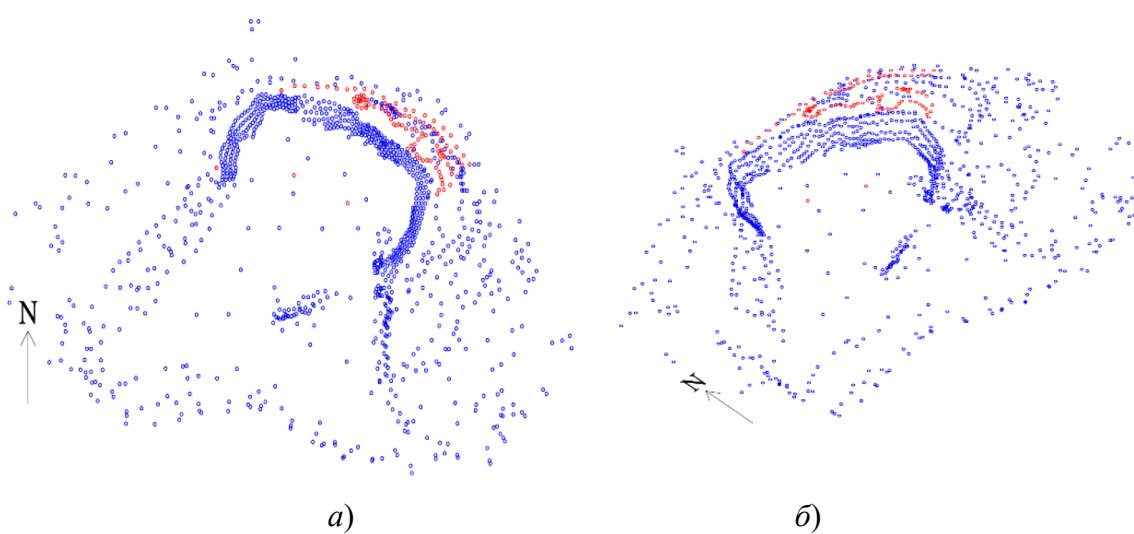


Рис. 2. Два вида точек рельефа карьера для второго периода съемки: по тахеметру – синий кружок, по приемнику ГНСС – красный кружок:  
а) вид сверху; б) изометрический

Чтобы подчеркнуть природоохранное применение, в исследовании проанализированы данные о пространственных изменениях в карьере с использованием спутниковых снимков области, показанной на рис. 3.

Снимки были отобраны для июня, когда в районе добычи полезного ископаемого предполагается максимальная растительность и ми-

нимальная облачность (менее 10 %). Для отображения состояния растительности были выбраны 2012, 2015 и 2019 гг.

Панхроматическое изображение имеет пространственное разрешение 15 м, а мультиспектральное – 30 м. Для дальнейшего анализа были выбраны мультиспектральные изображения [10–13].

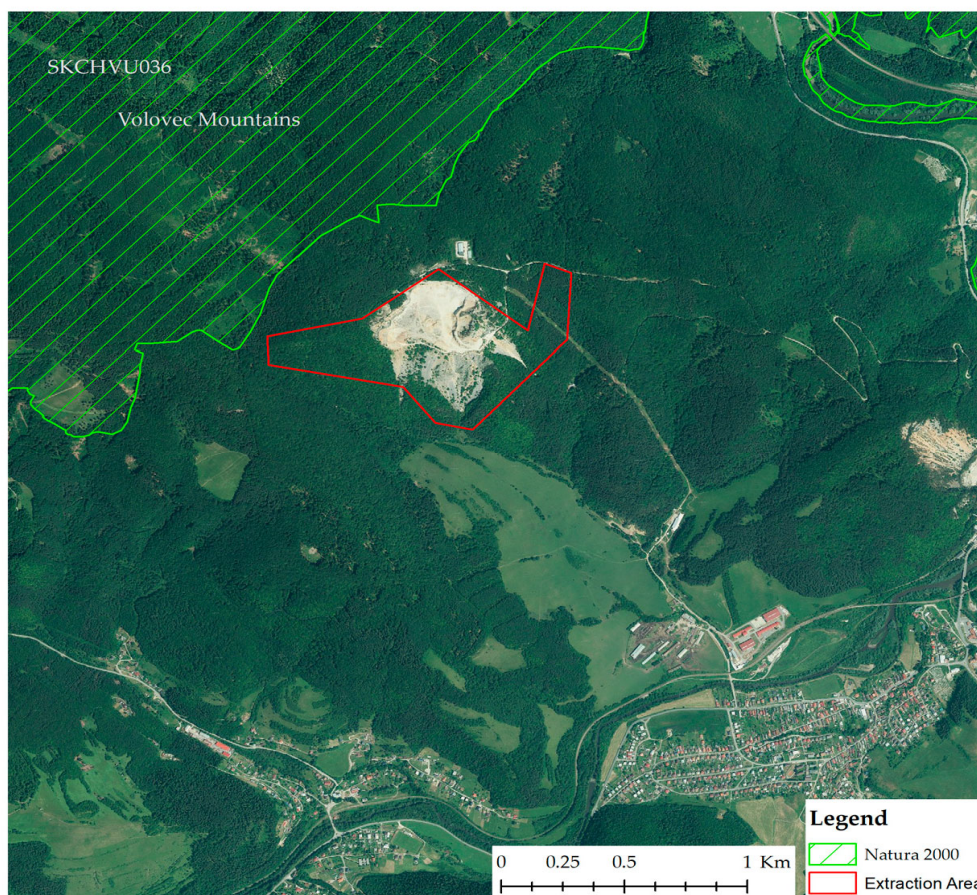


Рис. 3. Взаимное расположение охраняемой орнитологической территории и карьера Курт Скала

### Результаты

Для оценки состояния пространственного распределения карьера и воздействия горных работ на ландшафт с использованием систем САПР и ГИС была создана 3D-модель карьера. ЦМР предоставила возможности для моделирования, анализа и отображения явлений, связанных с рельефом и топографией, а также для отслеживания геоморфологических особенностей на уровне разнообразных процессов, происходящих на поверхности

Земли. ЦМР используется в качестве основы для регистрации специфических изменений, вызванных открытой добычей полезных ископаемых [11].

Для расчета объема необходимо время, чтобы создать ЦМР из доступных массивов точек. Их можно визуализировать с помощью модели TIN и GRID или контурных линий. Вставка структурных линий не влияет на размещение точек рельефа, но изменяет способ соединения треугольников, повышая точность расчета объема трехмерных неправиль-

ных тел. Расчет объема может производиться на всей площади или только на определенной ее части. Точность и время расчета зависят от размера сетки. Основная процедура расчета объема с помощью программного обеспечения происходит следующим образом [12]:

- создается 3D-чертеж (\*.dgn);
- путем импорта списков координат создается как минимум две поверхности (ЦМР);
- визуализируются отдельные модели, выполняются их проверка и редактирование треугольников с использованием структурных линий;

– выполняется расчет объем тела неправильной формы между двумя поверхностями.

При моделировании карьера использовалась 2 151 точка для двух периодов геодезических измерений. По результатам измерений были созданы две ЦМР для двух периодов измерения. Они использовались для определения извлеченного объема доломитового известняка между периодами измерений. Неправильно сгенерированные части контурных моделей карьера для двух периодов были изменены с использованием структурных линий (рис. 4).

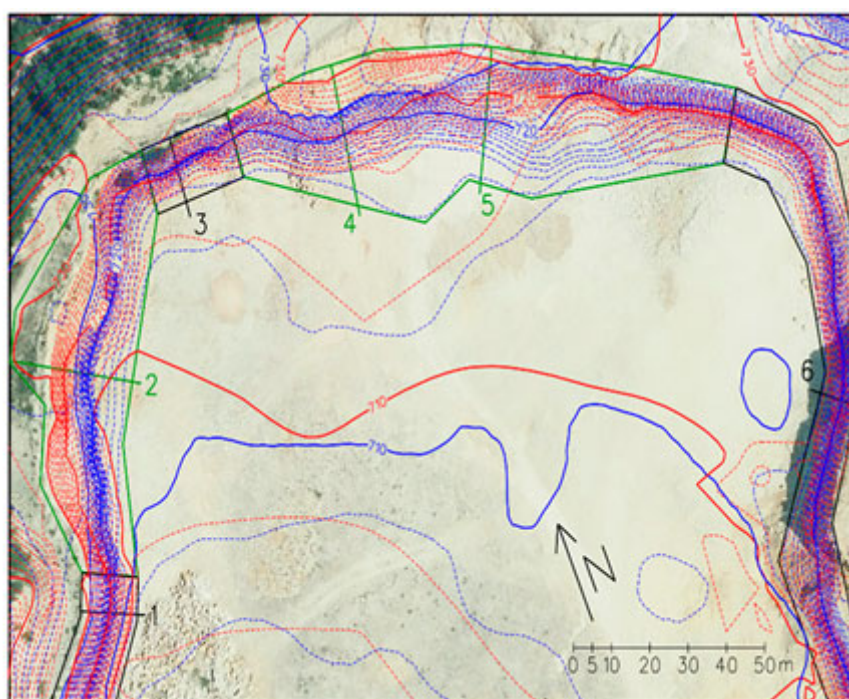


Рис. 4. Графическая визуализация контуров скальной стенки дна карьера по данным тахеометрических измерений

Скальную стенку карьера можно разделить на две зоны. Первая – это зона скального борта, незатронутая горными работами. Она показана черным цветом как область идентичной графики. Вторая – зона скальной стенки, затронутая горными работами. Она показана зеленым цветом. Идентичная область показана с минимальными различиями в плане и по высоте. Для этих участков показаны поперечные профили скального борта с пометками 1, 3 и 6.

В зеленых зонах можно наблюдать продвижение горных работ на анализируемом камен-

ном валу. Об этом свидетельствуют поперечные сечения, отмеченные цифрами 2, 4 и 5.

Текущая модель второго периода геодезической съемки (1 125 точек) использовалась для дальнейшей визуализации. Путем оцифровки карты добычи в масштабе 1 : 1 000 из предыдущего измерения было получено 1 020 точек местности в окрестностях карьера. Эти точки использовались для создания полной 3D-модели карьера с его окрестностями (рис. 5).

Используемая цветовая шкала позволяет выделить части разреза, включая его окрестности: свободные площади отдельных усту-

пов карьера – желтый; каменные стены – коричневый; окружающий лес – зеленый; насыпи, текущие горные работы – серый [13].

Контурная модель также состоит из изогип (контурных линий) с соответствующими данными о высоте. Горизонталы делятся на основные (с интервалом 10 м), усиленные

(с интервалом 20 м) и дополнительные (вспомогательные – с интервалом 2,5 м) (рис. 5).

Чтобы сравнить и показать влияние открытых горных работ на окружающую среду, была создана трехмерная модель поверхности из контурных линий на фоне топографической карты (рис. 6, а).

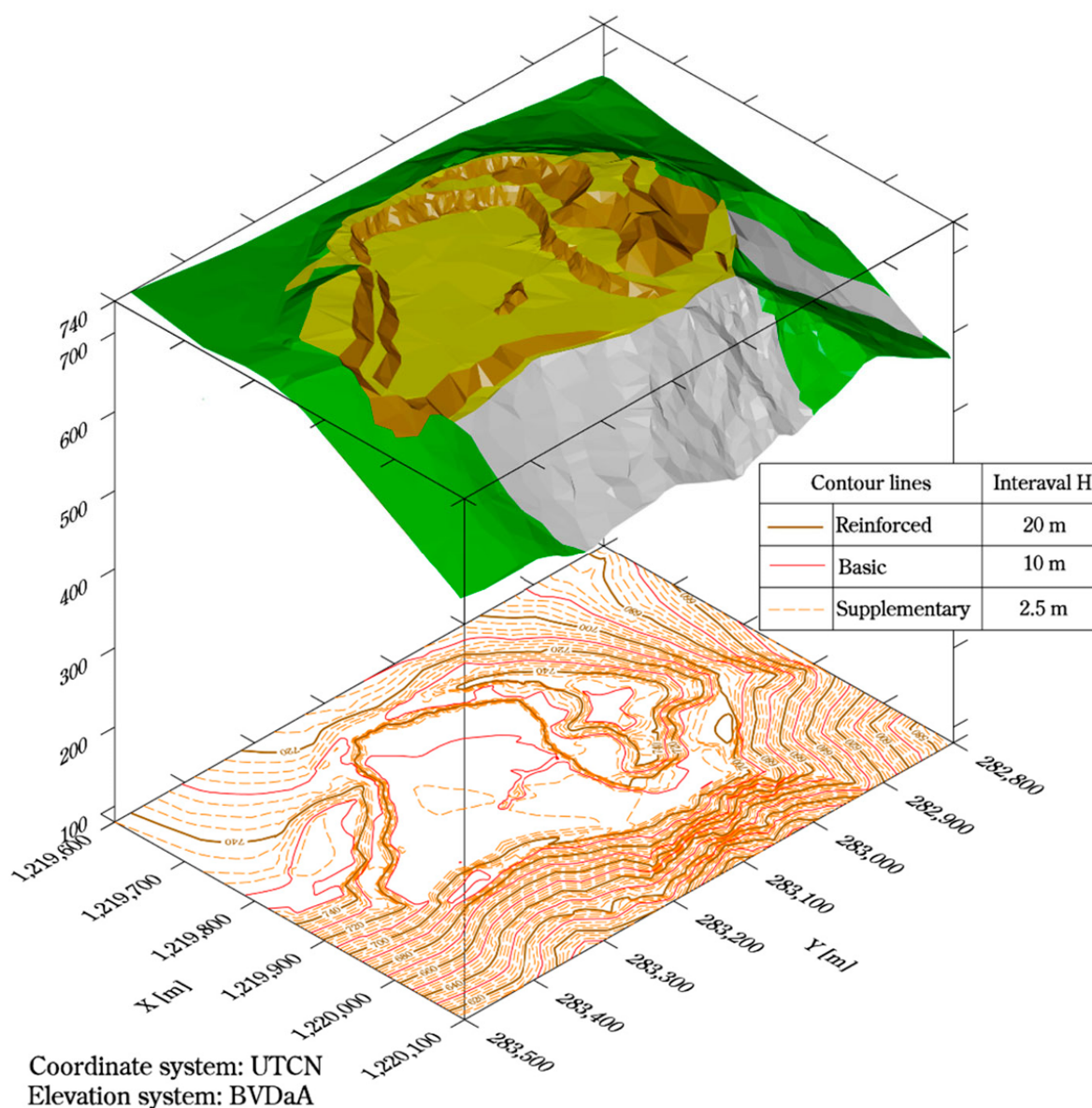


Рис. 5. Графическое изображение контура TIN модели карьера с применением цветового разрешения типа территории

Топографическая карта показывает состояние поверхности до того, как район подвергся разработке полезных ископаемых. Высшая точка скального массива находилась на отметке 791 м. На момент съемки самый

высокий рабочий уступ карьера находился на отметке 753 м, дно карьера – на отметке 710 м.

Пространственная модель, показанная на рис. 6, б, создана в ArcGIS Pro на основе геодезических измерений.

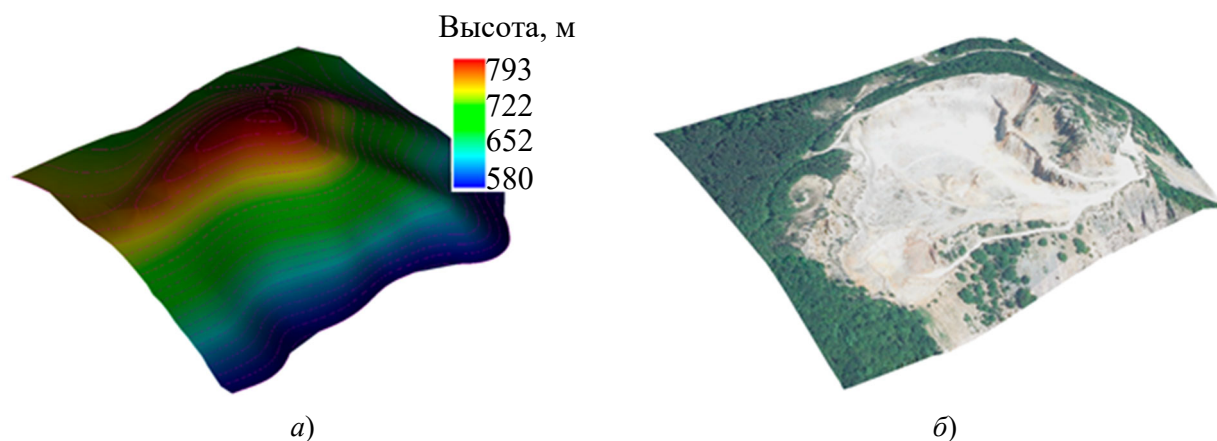


Рис. 6. Сравнение двух созданных моделей карьера:

а) модель с топографической карты (1980 г.); б) модель по геодезическим измерениям (настоящее время)

Модель контурных линий показывает исходное состояние поверхности для наглядности и сопоставимости с текущим состоянием. В результате расчета установлено, что за счет выемки всей кровли горного массива месторождение имело потерю объема  $3\,421\,000\text{ м}^3$ .

С точки зрения последующей и возможной рекультивации ситуация представляется достаточно сложной. В районе исследования вся верхняя часть массива горных пород была безвозвратно удалена. Снятие скального массива приводит к необратимому нарушению природной среды (известняковые породы являлись местом обитания редких видов растений) и особенно микроклимата региона [14].

Для оценки состояния растительности используют различные вегетационные индексы, которые могут характеризовать наличие определенного состояния растительности или состояния жизнеспособности, или здоровья растительности.

Результатами обработки изображений являются карты температуры поверхности суши (рис. 7) и карты вегетационного индекса (NDVI) (рис. 8). Сравнение карт земного покрова (за период 2012–2018 гг.) показало изменение в пространственном распределении отдельных классов земного покрова. Произошло сокращение площади смешанных лесов и увеличение площади неорошаемой пашни и широколиственных лесов. Площадь переходного редколесья-кустарника в 2018 г. не выявлена.

Индекс NDVI представляет собой простой вегетационный индекс. Он чувствителен к зе-

леной растительности, а также участкам, покрытым низкой растительностью. Индекс NDVI используется при сравнении изображений на ближайшие периоды для оценки экологически значимых изменений [15].

Пространственная изменчивость вегетационного индекса NDVI с разделением по (Earth Observing System) подтверждает изменение состояния представленной растительности на выбранном участке.

При сравнении ортофотоснимков не обнаружено признаков значительной убыли леса рубками, для общей оценки воздействия процессов открытых горных работ и деятельности человека необходимо более детальное наблюдение за территорией.

Результаты температурных карт за 2012, 2015 и 2019 гг. показали повышение температуры в местах, затронутых деятельностью человека как непосредственно в карьере, так и в близлежащих населенных пунктах. В карьере, несмотря на окружение лесом, температура достигала (2019 г. –  $29,7\text{ °C}$ , 2015 г. –  $29,3\text{ °C}$ , 2012 г. –  $31\text{ °C}$ ), сравнивая с температурой в городе (2019 г. –  $32\text{ °C}$ , 2015 г. –  $32\text{ °C}$ , 2012 г. –  $34,5\text{ °C}$ ).

Анализ индекса NDVI показал изменение состояния здоровья растительности на территории вокруг карьера. Значения индекса NDVI в диапазоне от 0,6 до 1 соответствуют здоровой и густой растительности, что подтверждает сокращение площади добычи с  $51,39\text{ га}$  (2012 г.) до  $0,18\text{ га}$  (2019 г.).

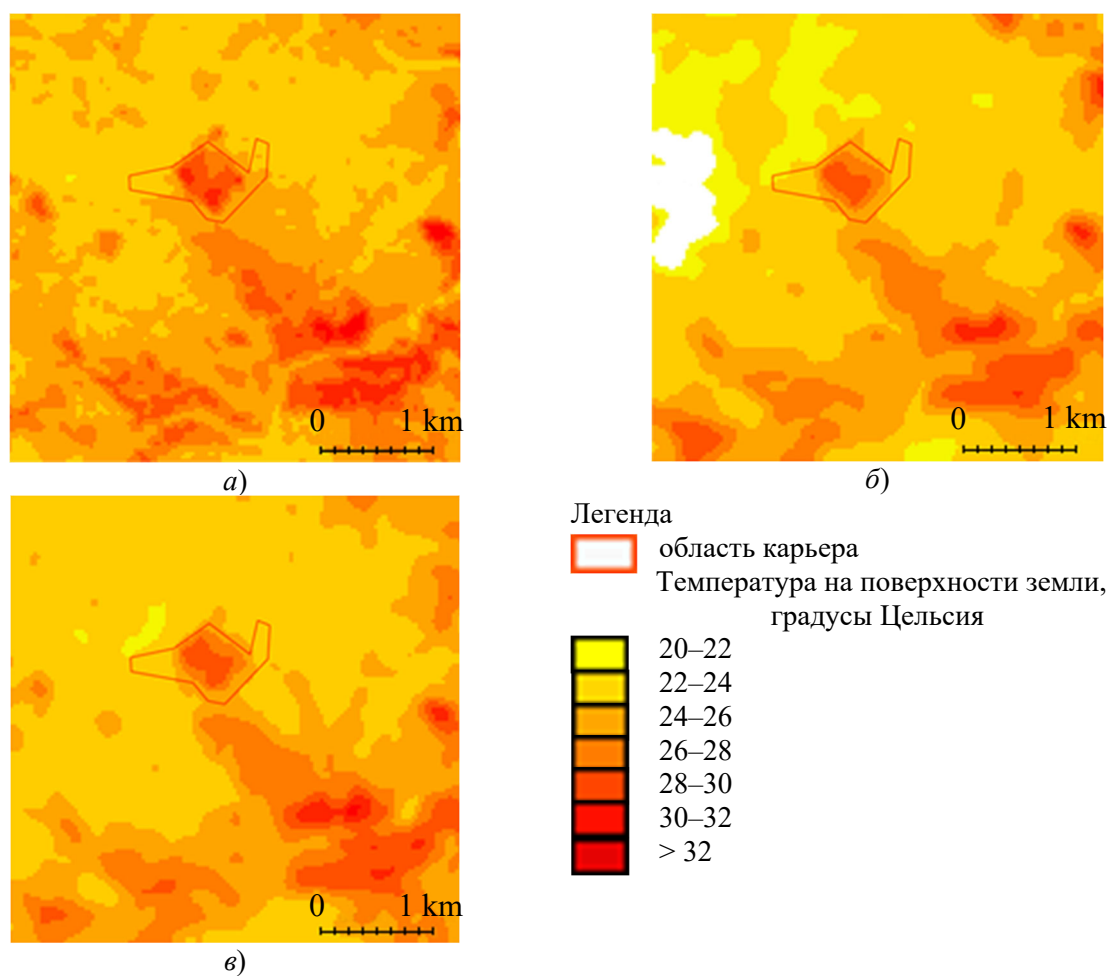


Рис. 7. Температура поверхности земли карьера:  
а) 30.06.2012 г.; б) 30.06.2015 г. в) 30.06.2019 г.

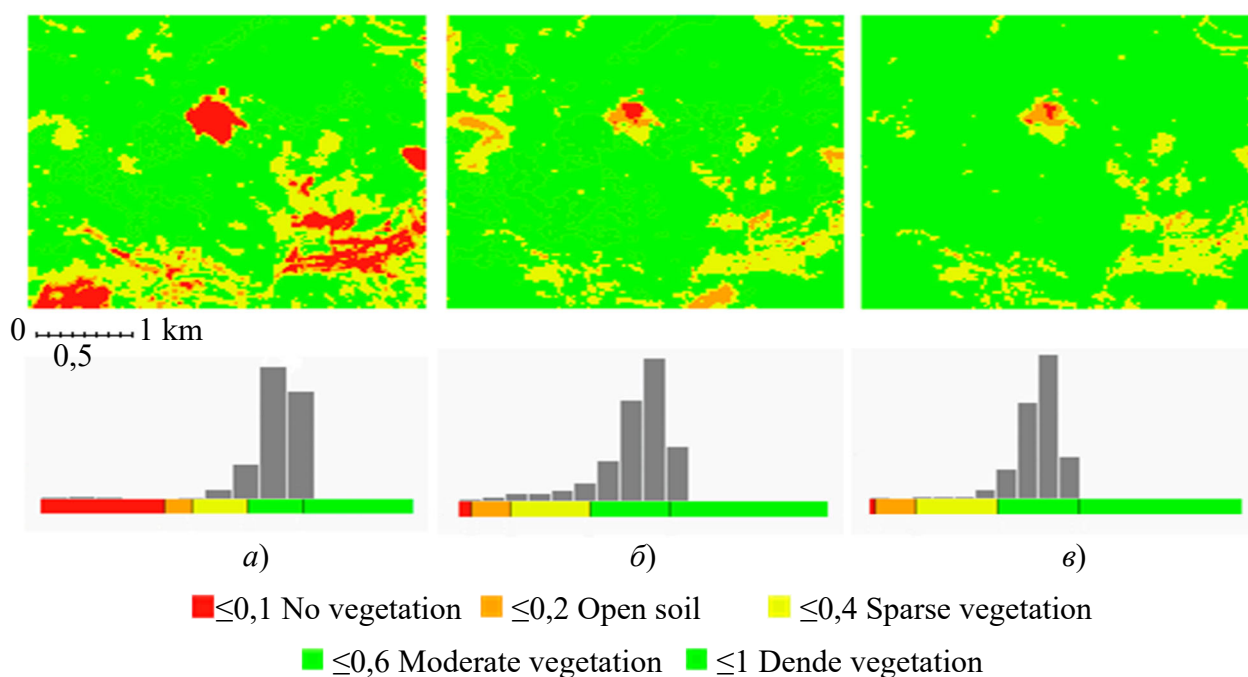


Рис. 8. NDVI карьера:  
а) 2012 г.; б) 2015 г.; в) 2019 г.



### Заключение

Результатом обработки и моделирования измеренных данных является 3D-модель карьера и его окрестностей. Созданная 3D-модель визуализируется с использованием цветовой шкалы различных частей карьера. Данная модель создана на основе достаточного количества информации, полученной в результате прямых измерений (спутниковых и наземных) и оцифровки предыдущей карты горных работ в аналоговом виде. Она позволит комбинировать и перекрывать несколько уровней слоев с различным содержанием.

Созданная модель является подходящей основой для завершения процесса добычи в последующие годы и мониторинга воздействия на природную среду участка.

После прекращения горных работ ее можно использовать в качестве основы для моделирования способа рекультивации и окончательного оформления ландшафта.

Для оценки влияния добычи полезных ископаемых на здоровье растительности необходимо более детально в последующем наблюдать за территорией. После добавления новых данных об окружающей среде в модель ее можно использовать как основу для моделирования влияния добычи полезных ископаемых на изменение микроклимата региона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашкин В. Б., Сухнин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
2. Басаргин А. А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 34–40.
3. Басаргин А. А. Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной системы Micromine // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 15–20.
4. Басаргин А. А., Писарев В. С. Проектирование буровзрывных работ при подземных горных работах с применением вееров в ГГИС Micromine // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр. : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 8 т. (Новосибирск, 18 июня–8 июля 2020 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. Т. 1, № 1. – С. 3–14.
5. Урумов В. А., Босиков И. И. 3D-модель и закономерности распределения полезных компонентов залежи Анненская Жезказганского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 11–16.
6. Шульга Е. С. Чем порадует 2018 год пользователей программы Micromine // Золото и технологии. – 2017. – № 4 (38). – С. 50–53.
7. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Бедарев А. С., Даулетова А. О. Исследование возможности 3D моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 178–183.
8. Lukáčová K., Badida M., Moravec M., Liptai P. Particulate Matters Propagation by the Surface Winding // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 244. – P. 197–202.
9. Zvijáková L., Zelenakova M., Purcz P. Evaluation of environmental impact assessment effectiveness in Slovakia // Impact Assessment and Project Appraisal. – 2014. – Vol. 32. – P. 150–161.
10. Huang X., Sillanpää M., Gjessing E. T., Peräniemi S., Vogt R. D. Environmental impact of mining activities on the surface water quality in Tibet: Gyama valley // Science of the Total Environment. – 2010. – Vol. 408. – P. 4177–4184.
11. Cianciolo T. R., McLaughlin D. L., Zipper C. E., Timpano A. J., Soucek D. J., Schoenholtz S. H. Impacts to water quality and biota persist in mining-influenced Appalachian streams // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 717. – P. 137216.
12. Krümmelbein J., Horn R., Raab T., Bens O., Hüttl R. F. Soil physical parameters of a recently established agricultural recultivation site after brown coal mining in Eastern Germany // Soil and Tillage Research. – 2010. – Vol. 111. – P. 19–25.

13. Labant S., Stančková H., Weiss R. Geodetic Determining of Stockpile Volume of Mineral Excavated in Open Pit Mine // *GeoScience Engineering*. – 2013. – Vol. LIX, No. 1. – P. 30–40.

14. Xu H. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-oriented Index Combination Technique // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 73(12). – P. 1381–1391. DOI:10.14358/PERS.73.12.1381.

15. Gama F., Cantone A., Mura J., Pasquali P., Paradella W., Ribeiro A., Silva G. Monitoring subsidence of open pit iron mines at Carajás Province based on SBAS interferometric technique using TerraSAR-X data // *Remote Sensing Applications Society and Environment*. – 2017. – Vol. 8. – P. 199–211.

### Об авторах

Андрей Александрович Басаргин – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем.

Получено 06.02.2023

© А. А. Басаргин, 2023

## Creation of a spatial model based on the results of geodetic measurements to analyze the environmental impact in small open pits

A. A. Basargin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: abaspirant@mail.ru

**Abstract.** Mining, especially open pit mining, has a significant impact on the terrain. The article discusses the use of geodetic methods to monitor the process of mining and its possible impact on the environment. The created relief model can be used to design the process of quarry restoration after their closure. The mineral wealth of a country is considered an important factor and is linked to the country's economy. Mineral resources are non-renewable, and their extraction and subsequent processing must take into account the rarity of their occurrence, the level of mining technologies to track spatial changes in mining operations. The main idea of this scientific study is to apply geodetic measurement methods to determine the current scale of mining in a quarry using a 3D terrain model. The paper presents an overview of the technologies used in performing geodetic measurements, as well as processing the measured data to assess the state of the spatial distribution of a quarry in order to determine the impact of mining on the landscape. The purpose of this article is to create a spatial terrain model based on the results of geodetic measurements to analyze the impact on the environment in small open pits. Methods of geodetic observations were used to create a spatial model of the terrain. Digital maps were also created by photogrammetric processing of aerial stereo images and subsequent semi-automatic removal of vegetation and other objects.

**Keywords:** geodetic measurement, mining process, open-pit mine, 3D model, volume determination, land surface temperature, NDVI

### REFERENCES

1. Kashkin, V. B., & Sukhnin, A. I. (2001). *Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing]*. Moscow: Logos Publ., 264 p. [in Russian].

2. Basargin, A. A. (2014). Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(25), 34–40 [in Russian].

3. Basargin, A. A. (2015). Geological 3D model-building by micromine GIS techniques. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 15–20). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

4. Basargin, A. A., & Pisarev, V. S. (2020). Design of drilling and explosion works in underground mining using in Micromine GIS. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2020: Natsional'noy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: T. 1, no. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2020: National scientific conference with international participation: Vol. 1, No. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 3–14). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
5. Urumov, V. A., & Bosikov, I. I. (2015). 3d-model and patterns of distribution of useful components of the Annenskaya deposit of the Zhezkazgan deposit. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy [Sustainable Development of Mountain Territories]*, 7(1), 11–16 [in Russian].
6. Shulga, E. S. (2017). What will please users of the Micromine program in 2018. *Zoloto i tekhnologii [Gold and Technology]*, 4(38), 50-53 [in Russian].
7. Besimbaeva, O. G., Khmyrova, E. N., Bedarev, A. S., & Dautetova, A. O. (2014). Study of the possibility of 3D modeling for mine surveying support for mining operations. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 178–183). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
8. Lukáčová, K., Badida, M., Moravec, M., & Liptai, P. (2015). Particulate Matters Propagation by the Surface Winning. *Solid State Phenomena*, 244, 197–202.
9. Zvijáková, L., Zelenakova, M., & Purcz, P. (2014). Evaluation of environmental impact assessment eectiveness in Slovakia. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 32, 150–161.
10. Huang, X., Sillanpää, M., Gjessing, E. T., Peräniemi, S., & Vogt, R. D. (2010). Environmental impact of mining activities on the surface water quality in Tibet: Gyama valley. *Science of the Total Environment*, 408, 4177–4184.
11. Cianciolo, T. R., McLaughlin, D. L., Zipper, C. E., Timpano, A. J., Soucek, D. J., & Schoenholtz, S. H. (2020). Impacts to water quality and biota persist in mining-influenced Appalachian streams. *Science of the Total Environment*, 717, P. 137216.
12. Krümmelbein, J., Horn, R., Raab, T., Bens, O., & Hüttl, R. F. (2010). Soil physical parameters of a recently established agricultural recultivation site after brown coal mining in Eastern Germany. *Soil and Tillage Research*, 111, 19–25.
13. Labant, S., Stančková, H., & Weiss, R. (2013). Geodetic Determining of Stockpile Volume of Mineral Excavated in Open Pit Mine. *GeoScience Engineering, LIX(1)*, 30–40.
14. Xu, H. (2007). Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematicoriented Index Combination Technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12), 1381–1391. DOI:10.14358/PERS.73.12.1381
15. Gama, F., Cantone, A., Mura, J., Pasquali, P., Paradella, W., Ribeiro, A., & Silva, G. (2017). Monitoring subsidence of open pit iron mines at Carajás Province based on SBAS interferometric technique using TerraSAR-X data. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 8, 199–211.

#### Author details

Andrey A. Basargin – Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Systems.

Received 06.02.2023

© A. A. Basargin, 2023