

## **ГИС-АНАЛИЗ ЦМР В ИНТЕРЕСАХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО РЕЛЬЕФА**

***Владимир Павлович Ступин***

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (964)103-08-17, e-mail: Stupinigu@mail.ru

***Ирина Александровна Карпова***

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (914)899-21-36, e-mail: karpova\_irina@mail.ru

На примере карьера Коршуновского ГОКа рассмотрены возможности обработки общедоступных ЦМР SRTM C-SIR и ASTER GDEM и материалов дистанционного зондирования, полученных со спутников LANDSAT и SENTINEL в SAGA GIS в интересах специализированного картографирования горнопромышленного рельефа. Приведены результаты построения производных геоморфометрических карт на основе ЦМР. Обоснованы ограничения использования рассматриваемых материалов.

**Ключевые слова:** специализированные карты, геоморфометрический анализ ЦМР, горнопромышленный рельеф

## **GIS ANALYSIS OF DEM IN THE INTERESTS OF SPECIALIZED MAPPING OF MINING TERRAIN**

***Vladimir P. Stupin***

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia, D. Sc., Professor Department of Surveying and Geodesy, phone: (964)106-08-17, e-mail: Stupinigu@mail.ru

***Irina A. Karpova***

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia, Senior Lecturer Department of Surveying and Geodesy, phone: (914)899-21-36, e-mail: karpova\_irina@mail.ru

Using the example of the Korshunovsky GOK quarry, the possibilities of processing publicly available SRTM C-SIR and ASTER GDEM DEM data and remote sensing materials obtained from LANDSAT and SENTINEL satellites in the SAGA GIS for specialized mapping of mountainous terrain are considered. The results of constructing derived geomorphometric maps based on DEM are presented. Restrictions on the use of the materials under consideration are justified.

**Keywords:** specialized maps, geomorphometric analysis of DEM, mining terrain

### ***Введение***

Специализированные карты горнопромышленного (ГП) рельефа являются разновидностью специализированных топографических карт, широко востребованных в самых разных областях человеческой деятельности [1]. Тематическое

наполнение этих карт выходит далеко за пределы содержания карт универсального назначения. Одновременно, они обладают точностью топографических карт, отсутствием которой страдают тематические карты [2].

В горной промышленности специализированные карты используются при проектировании горных предприятий, планировании и выполнении горных работ, а также реализации прогноза, мониторинга и анализа взаимодействия природных и антропогенных процессов в целях предотвращения критических и катастрофических ситуаций.

Специализированное картографирование горнопромышленных систем выполняется с учетом того, что основным фактором, определяющим их динамику является рельеф земной поверхности. Важно понимать, что в геологическом масштабе времени ГП рельеф формируется практически мгновенно и его развитие проходит в «форс-мажорном», часто катастрофическом режиме динамического неравновесия.

При добыче полезного ископаемого открытым способом это особенно относится к таким формам ГП рельефа, как карьеры (разрезы) и отвалы. Крутизна насыпных форм ГП рельефа обычно близка к углу естественного откоса, а склоны выработанных форм – круче его, что обуславливает высокую динамичность их эволюции.

Высота откосов уступов карьеров определяется устойчивостью грунтов, параметрами черпания экскаваторами и высотой развала после взрывов и составляет 10–20 м. Ширина площадок уступов достигает 40–80 м. Углы откоса рабочих уступов составляют для песчано-глинистых пород 35–45°, а для монолитных скальных пород 80–90°. Углы откосов нерабочих уступов принимаются, соответственно, 25–40° и 75–85° и определяются с учетом ширины рабочих площадок (для рабочего борта) и ширины предохранительных или транспортных берм (для нерабочего борта). Глубины современных карьеров в России достигают 300–400 и более метров.

В связи с этим специализированные карты ГП систем должны подробнее отображать морфологию мезо- и микрорельефа и его элементов – карьеров, отвалов, терриконов, дражных полей, а также раскрывать потенциальную опасность геологических процессов (обвалов, осыпей, оползней, эрозии). Специализация карт ГП рельефа заключается также во включении в них количественных показателей рельефа (длина, ширина, высота, глубина, крутизна, площадь, объемы, уклоны и т.д.).

Таким образом, специализированное картографирование ГП рельефа требует привлечения методов геоморфометрического и морфодинамического анализа, возможности которых реализуются в современных ГИС при обработке цифровых моделей рельефа (ЦМР) с использованием материалов дистанционного зондирования (ДЗЗ) [3, 4], что и стало объектом данного исследования, проведенного на примере Коршуновского ГОКа – одного из крупнейших за Уралом производителя железной руды, который обладает полным набором ярко выраженных форм ГП рельефа: глубоким карьером, обширными отвалами и большим отстойником-хвостохранилищем.

## *Методы и материалы*

SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) относится к категории настольных пользовательских ГИС с открытым и бесплатным кодом – таким, например, как GRASS или Quantum GIS), которые зачастую оказываются предпочтительнее проприетарных ГИС, таких как Mapinfo, ArcGIS, Geomedia [4–7]. Инструментарий SAGA GIS позволяет визуализировать ЦМР, создавать различные производные математико-картографические модели рельефа и представлять результаты моделирования в виде геоморфометрических карт.

Для визуального анализа горнопромышленного рельефа применены методы представления ЦМР на экране монитора – трехмерное отображение рельефа с различными углами наклона и разворота, аналитическая отмывка при разных азимутах и высотах источника косого освещения, вертикальное преувеличение рельефа, варьирование величины сечения горизонталей, использование шкал с различными интервалами цветов и оттенков.

Инструментарий SAGA позволяет на основе ЦМР не только визуализировать рельеф в виде растра отмывки и шейп-файла изолиний, но и получить много производных параметров, которые можно разделить на четыре блока: форма поверхности; освещенность, видимость и количество тепла; миграция вещества и энергии в твердом и жидком состоянии; гидрологический анализ [8-10]. Поэтому, одной из задач исследования был выбор параметров анализа ГП рельефа.

В ходе проведенных исследований в качестве исходных материалов использовались общедоступные ЦМР SRTM C-SIR и ASTER GDEM и данные ДЗЗ со спутников LANDSAT и SENTINEL. Обработка исходных материалов выполнена средствами SAGA GIS 7.9.0

Базовыми данными для ЦМР SRTM являются интерферометрические пары радарных снимков, полученные в 2000 г. с борта космического корабля многоцелевого пользования Shuttle сенсором SIR-C. ЦМР была создана в 2003 г силами NASA, NGA (США). ЦМР покрывает Землю от 60° с.ш. до 56° ю.ш. (80% поверхности земного шара) и имеет размер ячейки 1"×1" (30×30 м) на территорию США и 3"×3" (90×90 м) на остальной мир с декларируемой абсолютной точностью по высоте LE90 – менее 16 м и относительной менее 6 м [11-15].

Базовыми данными для ЦМР ASTER GDEM являются стереопары оптических снимков сенсора ASTER спутника Terra, запущенного в 2011 году под эгидой METI (Япония) и NASA (США). ASTER GDEM покрывают Землю от 83° с. ш. до 83° ю. ш. (99% поверхности земного шара) и имеет размер сетки 1"×1" (30×30 м) с абсолютной точностью по высоте LE90 – 12–30 м [16, 17].

Спутник LANDSAT-8, находящийся на орбите с 2013 года, оснащен сенсорами OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor). Он ведет съемку в 11 каналах, из них 8 с разрешением 30 м/пикс в видимом, ближнем ИК (каналы 1-5 и 9), и среднем ИК (каналы 6, 7), на 2 каналах (10, 11) с разрешением

100 м/пикс в тепловом диапазоне, а также на панхроматическом канале (8) с разрешением 15 м/пикс [18-20].

Спутники SENTINEL-2 (A/B) с сенсором MSI (Multispectral Instrument) являются частью программы Copernicus Европейского Космического Агентства (ESA, European Space Agency). Спутник SENTINEL-2A запущен в 2015 г., а SENTINEL-2B – в 2017 г. Их орбиты обеспечивают возможность съемки в средних широтах северного полушария с частотой каждые 2–3 сут. Спутники имеют по 13 каналов, из них 4 с разрешением 10 м/пикс в видимом и ближнем ИК (номера каналов 2–4, 8), 6 (номера 5–7, 8а, 11, 12) с разрешением 10 м/пикс в ближнем и среднем ИК диапазонах и еще 3 канала (1, 9, 10) с разрешением 60 м/пикс. Панхроматический канал отсутствует [21].

### *Результаты*

На предварительном этапе по данным ЦМР SRTM и ASTER GDEM с помощью инструмента Visualization> Grid> Terrain Map View были построены, визуализированы и проанализированы в 2D (рис. 1) и 3D (рис. 2) гипсометрические карты с горизонталями на территорию карьера Коршуновского ГОКа. Предварительно ЦМР были пересчитаны из географической системы координат в проекционную и обрезаны в рамках территории исследований.

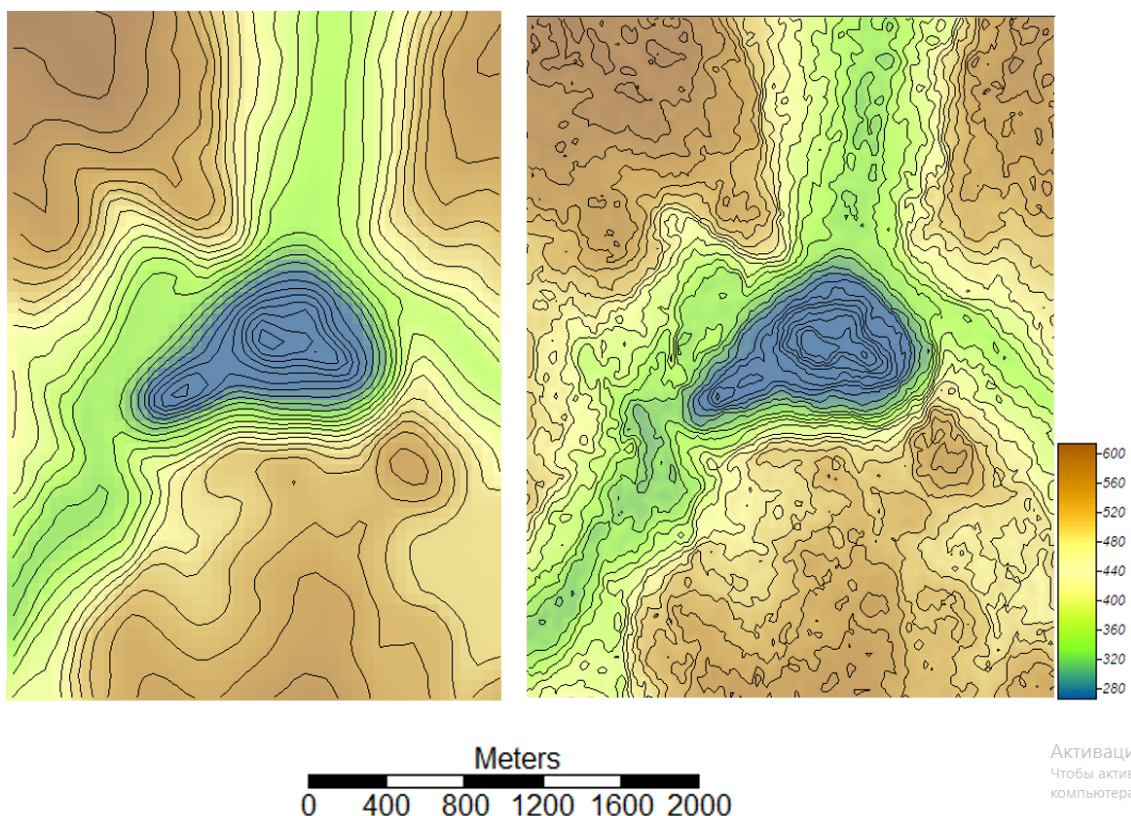


Рис. 1. Гипсометрические изображения, построенные по ЦМР SRTM C-SIR (слева) и ASTER GDEM (справа). Горизонтالي проведены через 20 м

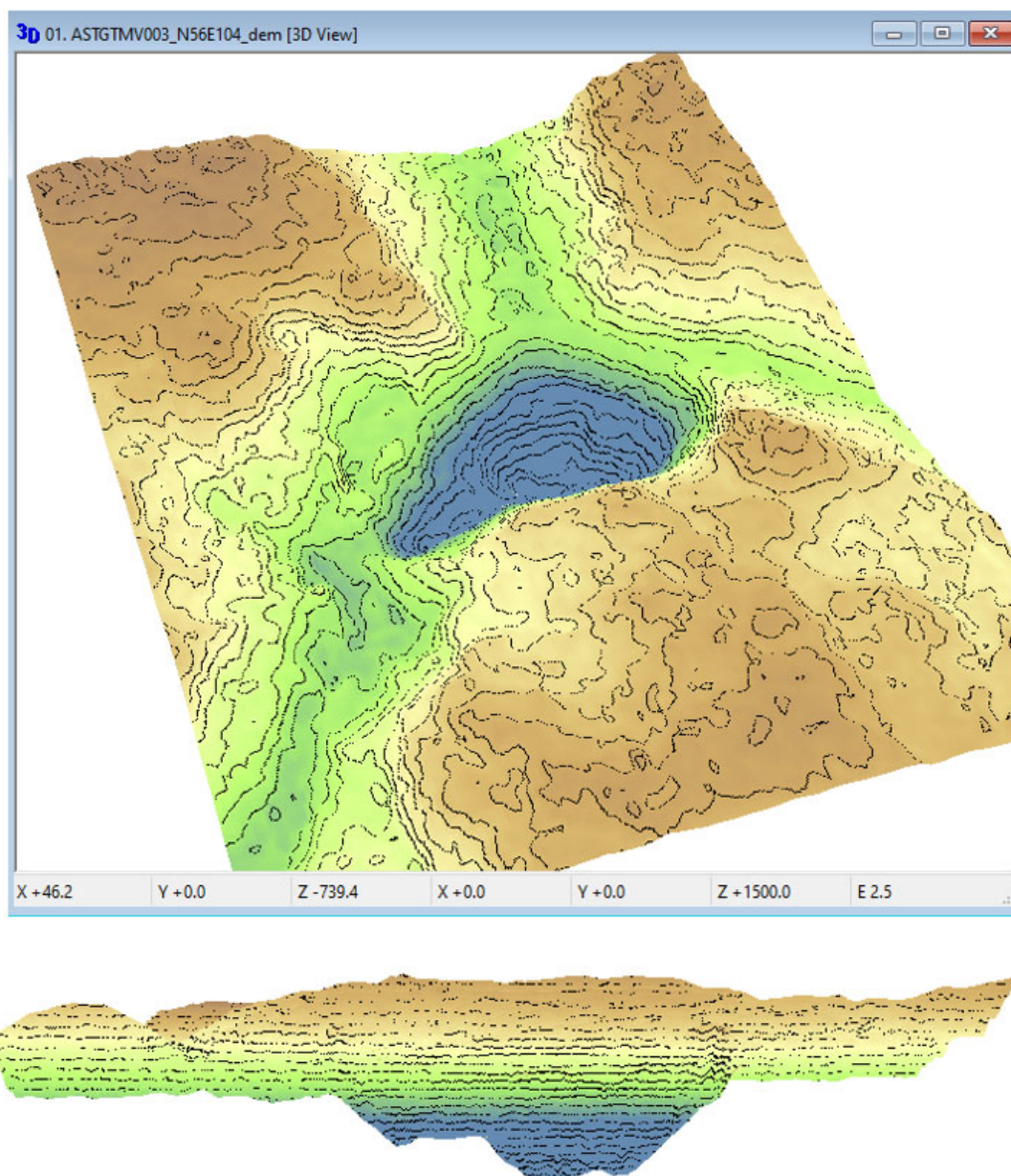


Рис. 2. 3D изображения в разных ракурсах, построение по ASTER GDEM. Вертикальный масштаб в 2,5 раза крупнее горизонтального

Затем, с использованием инструмента Terrain Analysis>Morphometry> Slope, Aspect, Curvature были вычислены, визуализованы и проанализированы основные производные локальные морфометрические параметры рельефа – крутизна, экспозиция, в также различные типы кривизны земной поверхности (общая, горизонтальная, вертикальная, тангенциальная, продольная, поперечная, минимальная, максимальная, линий тока). Визуально, с точки зрения оценки параметров карьера, наиболее информативными оказались крутизна, профильная кривизна и кривизна линий тока (рис. 3). Выявлено, что крутизна карьера в поперечном сечении для рабочего борта: максимальная/средняя –  $45^{\circ}/24^{\circ}$ ; для нерабочего –  $47^{\circ}/30^{\circ}$ . Глубина карьера 353 м.

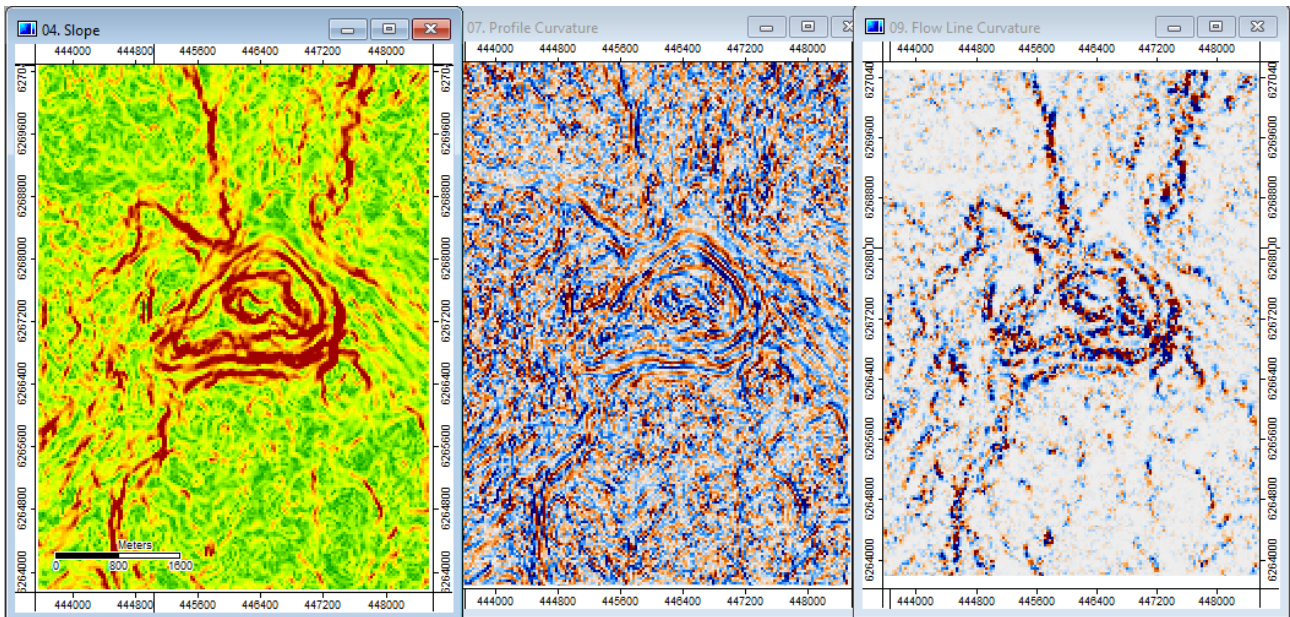


Рис. 3. Геоморфометрические карты, слева направо:

крутизна (Slope), профильная кривизна (Profile Curvature), кривизна линий тока (Flow Line Curvature)

Затем в SAGA был выполнен синтез снимков LANDSAT и SENTINEL в разных сочетаниях каналов (рис. 4) и анализ синтезированных изображений на предмет повышения информативности ЦМР при исследовании ГП рельефа.



Рис. 4. Комбинация 432 (Natural Color)

Слева – снимок LANDSAT-8, 13.07.2020, 30 м/пикс.: справа – SENTINEL-2, 09.06.2020, 10 м/пикс.

### *Обсуждение*

Анализ результатов исследования показал, что ЦМР ASTER GDEM (шаг сетки 30 м), а тем более SRTM (шаг сетки 90 м), позволяют напрямую достаточно

уверенно определить лишь крупные карьеры, а также их днища, рабочие и нерабочие борты и средние углы их откоса, но не позволяют выявить и измерить их детали, например, предохранительные уступы на нерабочем борту, рабочие уступы и массивы отбитой породы на рабочем борту и их количественные характеристики. Декларируемое разрешение этих ЦМР достигается только на равнинном, незалесенном и незастроенном рельефе. В случае ГП рельефа, более или менее достоверные данные можно получить при наличии склонов одной крутизны размером не менее 60×60 м для ASTER GDEM и 180×180 м SRTM. При меньших размерах детали таких участков теряются, а сами участки искажаются по высоте, уклонам и другим геоморфометрическим показателям.

Характер потенциальных денудационно-аккумулятивных процессов в крупных карьерах наиболее полно отражают определяемые в SAGA морфометрические параметры рельефа: угол наклона (Slope), плановая и горизонтальная кривизна (Plan and Profile Curvatures). В меньшей степени – индексы конвергенции (Convergence Index), водосборная площадь (Total Catchment Area) моделирование тальвегов (Channel Network) и бассейнов (Drainage Basins).

Находящиеся в свободном доступе материалы миссий Landsat и Sentinel позволяют в значительной степени уточнить детали ГП рельефа путем полноценного ГИС-анализа изображений (синтез, визуальное и автоматизированное дешифрирование). Однако детальность этих изображений невелика. На них плохо видны даже уступы карьера кроме тех, по которым проходят двухполосные карьерные дороги, хорошо различимые благодаря светлому, почти белому тону

Более детальный анализ элементов карьера (площадки и откосы рабочих уступов, предохранительные и транспортные бермы, капитальные и разрезные траншеи и т.п.) выполнен по фрагментам изображений из некоммерческой Интернет-ГИС Google Earth Pro (рис. 5), с геопривязкой этих фрагментов по координатам, полученным из самой Google Earth, и наложением их на ЦМР. Однако возможности ГИС-анализа таких изображений ограничены.

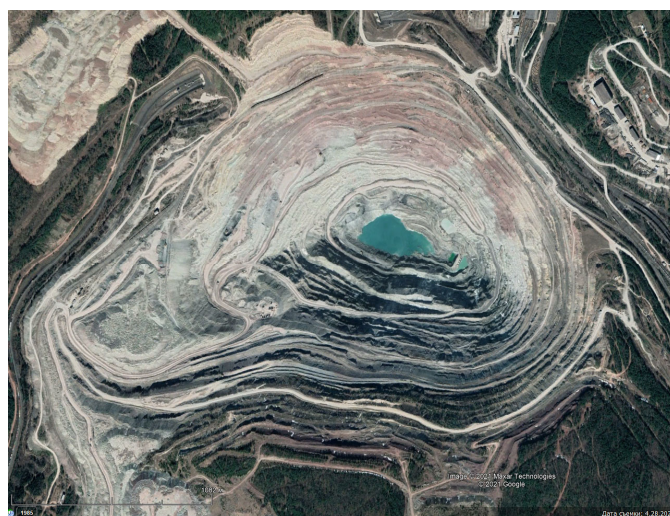


Рис. 5 Карьер Коршуновского ГОК на изображении из Google Earth. Сенсор неизвестен (возможно World View). Разрешение примерно 2-3 м

Другим источником уточняющей информации являются синтезированные изображения. Наибольший интерес представляют каналы Sentinel 1–4 (R, G, B, NIR) с разрешением 10 м/пикс, обеспечивающие без преобразований *pan-sharpening* более высокое разрешение, чем снимки LANDSAT. Эти каналы относятся к видимому диапазону, в котором ГП рельеф имеет более высокую яркость по сравнению с ненарушенными окружающими поверхностями. Снижение яркостей ГП рельефа в NIR диапазоне приводит к нулевым и отрицательным значениям NDVI. На снимках, синтезированных в 754 (SWIR-NIR-RED) диапазонах, карьеры, как и прочие участки нарушенных земель, отображаются различными оттенками яркого розового цвета (рис. 6).

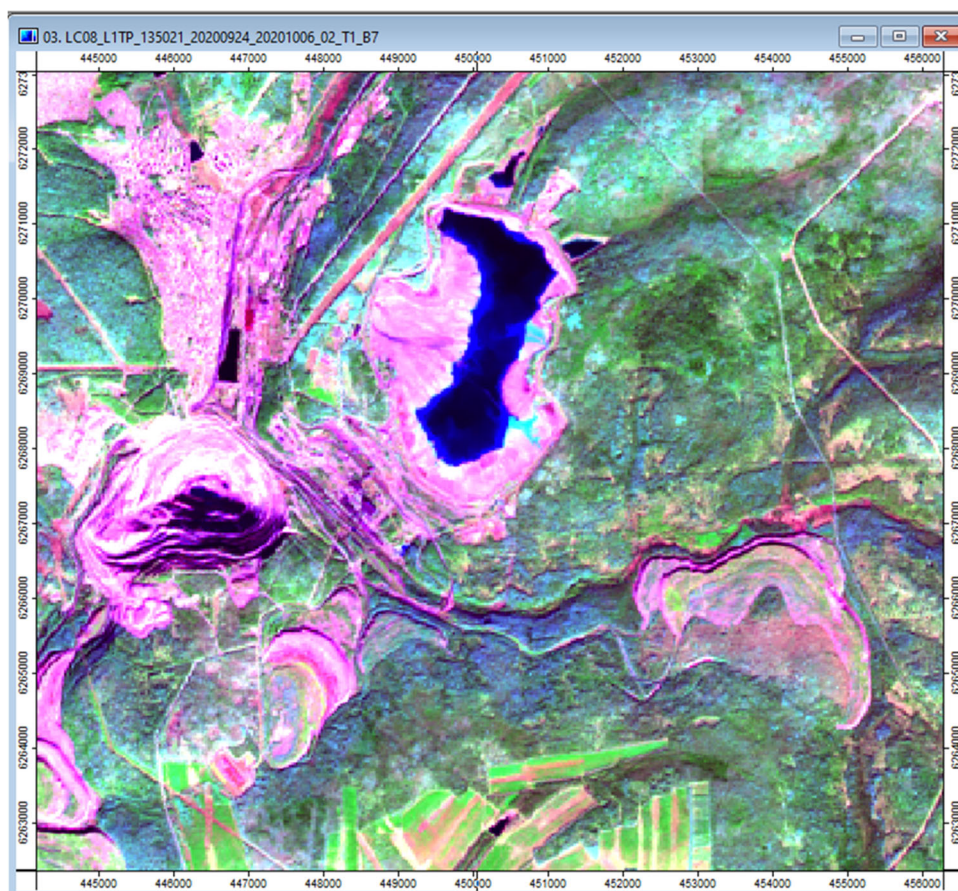


Рис. 5. Изображение SENTINEL-2A, синтез 754

### *Заключение*

Анализ ЦМР с помощью ГИС является эффективным средством информационного обеспечения специализированного картографирования ГП рельефа. ГИС позволяют осуществлять координатную привязку объектов, определять их морфометрические показатели, создавать множество производных геоморфометрических карт.



Важным дополнением к анализу и картографированию ГП рельефа является использование материалов ДЗЗ. Средства ГИС позволяют выполнять его синтезирование и автоматизированное дешифрирование, а также привязку к ЦМР в том числе и в 3D формате.

Использование ЦМР и материалов ДЗЗ открытого пользования позволяет осуществить полноценный сбор и обработку данных для специализированного картографирования ГП рельефа в средних масштабах. Возможности крупномасштабного картографирования ограничены разрешающей способностью этих материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдман Л. М., Сорокина Н. Г. Содержание, оформление и размножение специализированных топографических планов (требования и рекомендации) // М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1973. – С. 60.
2. Верещака Т. В. Специализированные топографические карты России и зарубежных стран. Их особенности и роль в обеспечении устойчивого развития территории // Геодезия и картография. – 2020. – № 10. – С. 30–41. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-964-10-30-41
3. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Баранов Ю.Б., Берлянт А.М., Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Серапинас Б.Б., Филиппов Ю.А. // М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – С. 204.
4. Дубинин М.Ю., Рыков Д.А. Открытые настольные ГИС: обзор текущей ситуации. // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации, 5 (72), 2009. – С. 20–27.
5. [Электронный ресурс]. – Welcome to the SAGA Homepage: URL: <http://saga-gis.org/en/index.html> (дата обращения 10.04.2021)
6. Conrad, O. SAGA – program structure and current state of implementation // SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, 2006 – P. 39–52.
7. SAGA vs GRASS: A Comparative Analysis of the Two Open Source Desktop GIS for the Automated Analysis of Elevation Data / Hengl, T., Grohmann, C.H., Bivand, R.S., Conrad, O., & Lobo, A. // R. Purves, S. Gruber, R. Straumann, & T. Hengl (Eds.), *Geomorphometry 2009, Conference Proceedings*. – P. 22–27.
8. Florinsky, I.V. Computation of the third order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(2), 2009. – P. 213–231. DOI: 10.1080/13658810802527499.
9. Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology* // Amsterdam: Academic Press, 2012. – P. 379.
10. Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R.J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.68. – P. 251–266. Online at ASPRS.
11. Farr T.G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* – 2007. – V. 45, No 2. – Art. RG2004. – P. 1-33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
12. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape association of SRTM error // *Remote Sens. Environ.* – 2011. – V. 115, No 6. – P. 1276-1587. doi: 10.1016/i.rsi.2011.02.017
13. Rodriguez, E., C. S. Morris, et al. // *An assessment of the SRTM topographic products*. – 2005. – JPL Pub. D31639: 143.
14. A. K. Karwel, I. Ewiak, Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing : 2008. – P. 169–172.
15. SRTM Data in Turkey: Void Filling Strategy and Accuracy Assessment / Oztug Bildirici, Aydin Ustun, Necla Ulugtekin, H.Zahit Selvi, Alpay Abbak, Ilkay Bugdayci, A. Ozgur Dogru // Sel-

cuk University, Faculty of Engineering, Dept. of Geodesy & Photogrammetry, Istanbul Technical University, Civil Eng. Faculty, Dept. of Geodesy & Photogrammetry Eng., Turkey.

16. ASTER Global DEM Validation. Summary Report. // ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. – 2009. – P. 28.

17. [Электронный ресурс]. – Anatomy of Landsat 8, USGS satellite, USGS, NASA, 13 June 2017, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XiaXDomrooE&feature=youtu.be>

18. [Электронный ресурс]. – Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, LSDS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS, 2015. – P.98.

19. [Электронный ресурс]. – Landsat 8 Data Users Handbook: URL: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook> (дата обращения 15.04.2021)

20. [Электронный ресурс]. – Sentinel Toolboxes. ESA: URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes> (дата обращения 20.04.2021)

© В. П. Ступин, И. А. Карпова, 2021