

УДК 622:528.88

Смирнов Александр Юрьевич

научный сотрудник,
лаборатория геоинформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620219, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ
МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА
СОКОЛОВСКО-САРБАЙСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ***

Аннотация:

На современном этапе развития горного дела при разработке месторождений широко используются цифровые технологии. Для целей прогнозирования и анализа гидрогеологического режима месторождений применяются численные геофильтрационные модели. В свою очередь, в геофильтрационных моделях широко используются цифровые модели рельефа (ЦМР) в качестве кровли верхнего модельного пласта. Необходимость подготовки цифровых моделей рельефа достаточной точности и требуемого качества является одной из важных проблем геоинформационного моделирования.

В качестве объекта исследования рассмотрено Соколовское железорудное месторождение – территория шахтного поля ш. «Соколовская» и хвостохранилища. Данная территория характеризуется сложными горно-геологическими условиями, развитием воронок обрушения. Мониторинг динамики развития воронок обрушения является важным вопросом безопасности ведения работ. В свою очередь, актуализация цифровой модели рельефа вследствие динамических изменений микрорельефа является важной геоинформационной проблемой.

В данной статье рассмотрен вопрос выбора оптимального источника данных по результатам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и определения методики дополнительной постобработки таких данных. Разработана методика оценки исходных данных, их корректировки и повышения точности результирующих цифровых моделей рельефа. Отмечено, что использование интерполяции методом кригинга (по сравнению с линейными интерполяторами) позволяет корректно объединить разнородные по количеству и качеству данные. При этом наиболее важным этапом данной методики является вариограммный анализ – подбор статистической функции, описывающей закономерность распределения интерполируемого параметра.

DOI:

Smirnov Alexander Yu.

Researcher,
Laboratory of geoinformation
and digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: alexsm94@gmail.com

**APPLICATION OF COMBINED
DATA SOURCES TO CREATE
A DIGITAL TERRAIN MODEL
OF THE SOKOLOVO-SARBAYSKOYE
MINING FIELD**

Abstract.

At the present stage of development of mining, digital technologies are widely used in the development of deposits. For the purposes of forecasting and analyzing the hydrogeological regime of deposits, numerical geofiltration models are used. In turn, digital elevation models (DEMs) are widely used in geofiltration models. The need to quickly prepare a DEM of sufficient accuracy and quality for a given purpose is one of the important problems of geographic information modeling.

The Sokolovskoye iron ore deposit as the object of the study is the territory of the mine field of the Sokolovskaya mine and the tailings dump. This territory is characterized by complex mining and geological conditions, the development of collapse craters. Monitoring the dynamics of the development of collapse craters is an important issue of work safety. In turn, updating the digital terrain model due to dynamic changes in the microrelief is an important geoinformation problem.

This article discusses the issue of choosing the optimal data source based on the results of Earth remote sensing (ERS) and determining the methodology for additional processing of such data. A method for assessing the initial data, adjusting them and increasing the accuracy of the resulting digital relief models has been developed. It is noted that the use of interpolation by the kriging method makes it possible to correctly combine data of heterogeneous quantity and quality. At the same time, the most important stage of this technique is variogram analysis, selection of a statistical function describing the distribution pattern of the interpolated parameter.

* Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН №075-00412-22 ПР тема 2. Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), рег. № 123012300006-0.

Ключевые слова: Соколовско-Сарбайское месторождение, дистанционное зондирование Земли, цифровые модели рельефа, геоинформатика, кригинг, вариограммный анализ.

Key words: Sokolovo-Sarbaykoye mining field, Earth remote sensing, digital elevation models, geoinformatics, kriging, variogram analysis.

Введение

Работы по эксплуатации и разработке проектных решений для объектов горнодобывающей промышленности на современном этапе не обходятся без широкого применения цифровых технологий. При этом основными задачами инженерного обеспечения горных работ являются геологическая доразведка (эксплуатационная), проектирование, планирование горных работ и маркшейдерское сопровождение [1]. Каждый из этапов требует обработки и использования различных пространственно-распределенных данных. В свою очередь, для работы с такими данными используются специализированные программные продукты начиная от классических геоинформационных систем (ГИС) до различных горно-геологических геоинформационных систем (ГГИС), сред компьютерного моделирования и оперативного управления процессами.

Одной из составляющей частей, влияющих на безопасность при работе по добыче полезных ископаемых, является знание гидрогеологического режима месторождения, фильтрационных параметров вмещающих пород и балансовых составляющих. Для целей прогнозирования и анализа режима применяются численные геофильтрационные модели. В свою очередь, в геофильтрационных моделях в качестве кровли первого модельного пласта зачастую используют цифровые модели рельефа (ЦМР). Качество ЦМР может значительно повлиять на балансовые составляющие по водопритокам, расходам на инфильтрацию и т.д. [2]. Только при корректно откалиброванной модели могут быть получены качественные и количественные оценки, позволяющие разработать последующие инженерные решения.

Целью данного исследования являлось создание методики предварительной подготовки цифровых моделей рельефа для целей дальнейшего геофильтрационного моделирования, одновременно удовлетворяющей требованиям по точности и низким трудозатратам на обработку исходных данных.

Методы исследования

Помимо имевшихся карт, планов и материалов исполнительных съемок в качестве основы ЦМР для проведения исследования использовались данные дистанционного зондирования (ДЗЗ). В качестве основы ЦМР рассматривались следующие источники данных:

– данные SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) – ЦМР, полученная по результатам радиолокационной топографической миссии шаттла, проведенной с 11 по 22 февраля 2000 г., наиболее широко применяемая в исследованиях научного сообщества;

– данные AW3D (ALOS World 3D) – ЦМР, полученная по результатам ДЗЗ в 2014 г. в рамках программы PRISM со спутника ALOS Японского Агентства Аэрокосмических Исследований (JAXA);

– данные Copernicus GLO-30 DEM – ЦМР, полученная по результатам ДЗЗ с 2011 по 2015 г. с немецкого спутника TanDEM-X в рамках программы Европейского Космического Агентства (ESA).

Для сравнения качества ЦМР между собой были выбраны створы в пределах хвостохранилища и шахтного поля ш. «Соколовская» – объектов Соколовского железорудного месторождения, характеризующегося сложными гидрогеологическими условиями. Для шахтного поля характерно развитие воронок обрушения, вызванных

усадкой закладочного материала, самообрушения вмещающих пород и последующего выхода песчано-глинистой смеси в горные выработки (прорывов) [3]. Сотрудниками Института горного дела УрО РАН ранее выполнялись работы по наблюдению за вертикальными сдвигами и развитию воронок обрушения методами спутниковой интерферометрии, что, в свою очередь, свидетельствует о возможности широкого применения данных дистанционного зондирования для исследуемой области [4].

При выборе пространственного положения анализируемых профилей необходимо руководствоваться следующими правилами: такой профиль должен, во-первых, проходить через представляющие интерес для дальнейшего исследования объекты, во-вторых – пересекать участки с быстро меняющимся рельефом (откосы хвостохранилищ и отвалов, уступы карьеров и т.д.). На рис. 1 приведено плановое расположение профиля по линии 1-2.



Рис. 1. Плановое положение профиля 1-2

Для анализа качества данных ДЗЗ в створе 1-2 были построены продольные профили (рис. 2), которые, в свою очередь, сопоставлялись с топографическими данными последних лет: планами, исполнительными съемками, данными натурных измерений по результатам мониторинга. Уточнялось, насколько высотные отметки по данным ДЗЗ для контрольных участков отличаются от реально существующих.

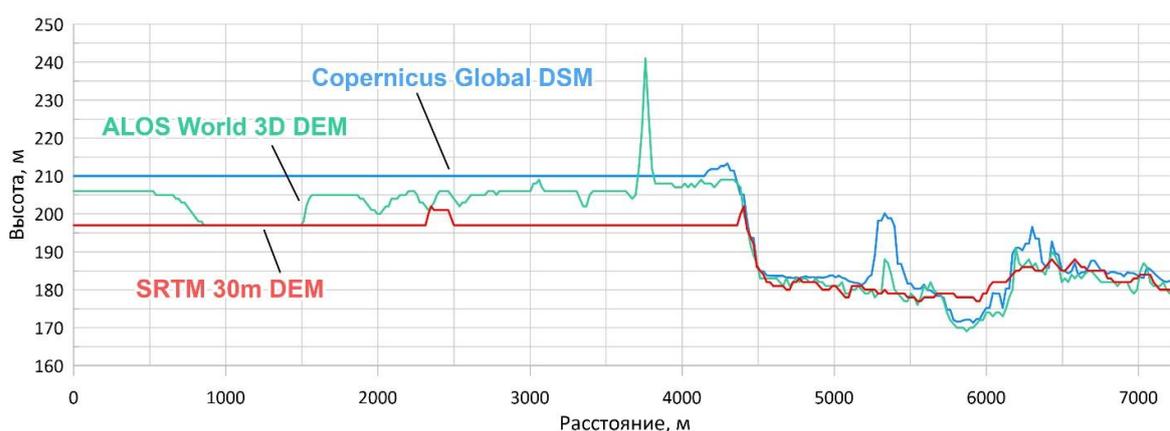


Рис. 2. Сравнение ЦМР различных источников ДЗЗ по профилю 1-2

По результатам анализа было установлено, что наиболее репрезентативной ЦМР является модель на базе съемки спутника TanDEM-X – космической программы Copernicus. Для актуализации цифровой основы Copernicus Global DSM была дополнена топографическими данными последних лет. Так, на примере рассматриваемого участка хвостохранилища и зоны обрушения были использованы данные исполнительной

съемки по результатам мониторинга за 2022 г. На основе векторных данных топографического плана масштаба 1:5 000 было сформировано облако точек (рис. 3) с высотными отметками из соответствующих тематических слоев: рельефные отметки, пикеты, изолинии рельефа, бровки уступов и т.д. Полилинии, в свою очередь, разбивались по узловым точкам.



Рис. 3. Импорт векторных данных цифрового плана хвостохранилища

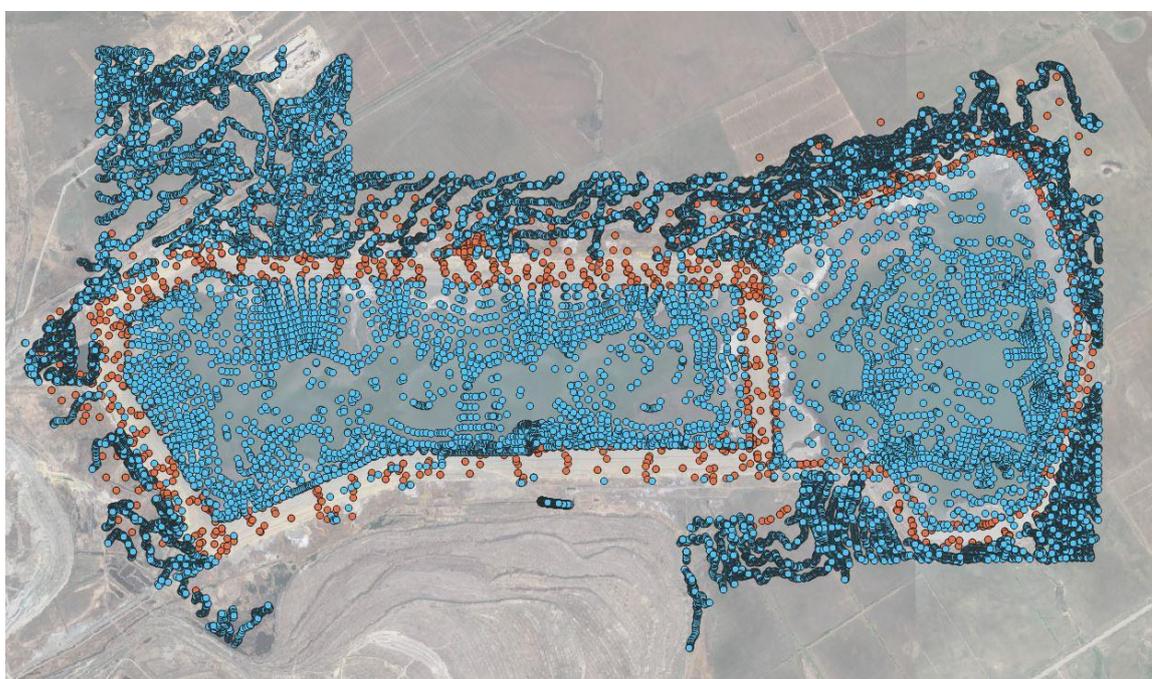


Рис. 4. Результирующее облако точек цифрового плана хвостохранилища. Коричневыми точками показаны данные мониторинга откосов хвостохранилища, синими – данные исполнительной съемки 2022 г.

В результате обработки данных на территорию хвостохранилища (рис. 4) было получено облако точек (около 29 тыс.), сохраненных для дальнейшей работы в формате файла с разделителем CSV (Comma-separated values). Аналогичным образом были актуализированы данные о поверхности рельефа на других участках района

исследования: зоны обрушения, карьеров и отвалов Соколовско-Сарбайского железорудного месторождения.

Объединение базовой ЦМР Copernicus Global DSM с данными актуальных съемок было выполнено методом кригинга – геостатистическим методом интерполяции, основывающимся на геостатистических моделях, включающих анализ автокорреляции (статистических отношений между измеренными точками) [5 – 8]. Данный метод использовался по той причине, что позволяет корректно сличить разнородные данные (данные разной плотности, различного шага сетки, градиента изменения рельефной отметки и т.д.) в отличие от классических методов интерполяции, применяемых, например, в TIN-моделях [9].

Прежде чем приступить к объединению двух источников данных, был выполнен анализ Copernicus Global DSM на предмет наличия и (или) отсутствия данных с нулевыми и отрицательными отметками (обычно характерными для участков с отсутствующими данными, содержащими ошибки). Для этого в ГИС была выполнена поинтервальная классификация высотных отметок (рис. 5). Красным цветом были выделены участки с нулевыми отметками. По результатам анализа можно сделать вывод, что ЦМР является целостной – участки в центральной части принадлежат к уступам Соколовского и Сарбайского карьеров, соответственно. Участки по периметру ЦМР являются типичным следствием появления артефактов при перепроецировании (в нашем случае общегеографической в прямоугольную систему координат) и трансформации. Данные участки были обрезаны и исключены из последующей обработки.

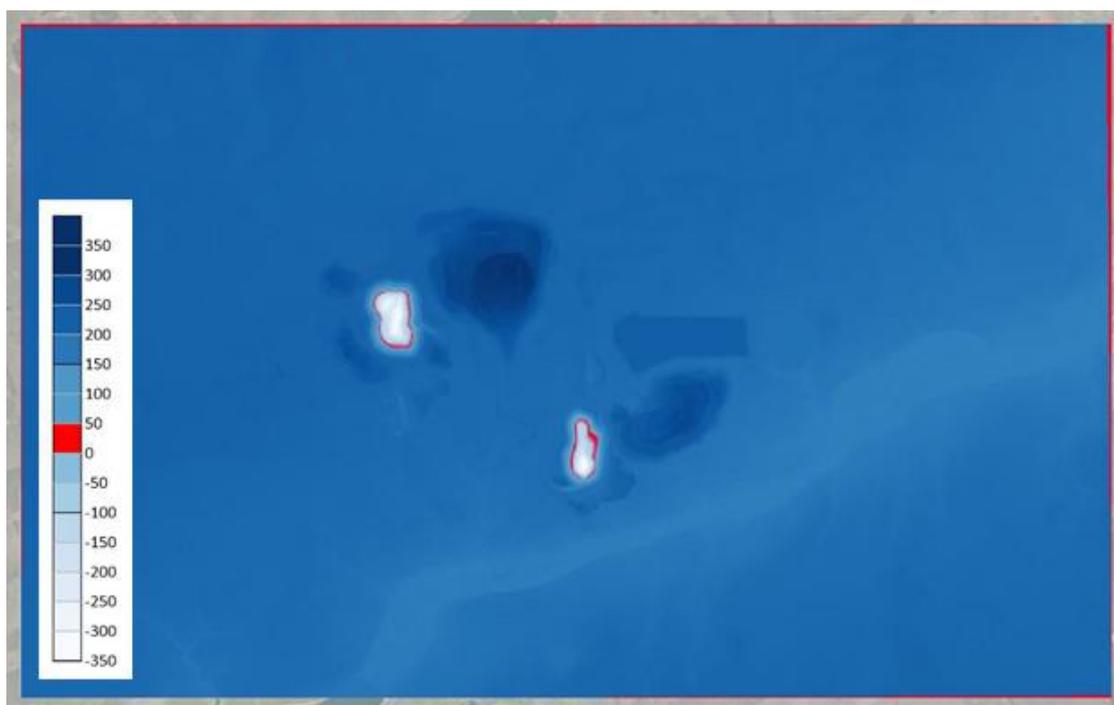


Рис. 5. Поверхность рельефа на основе Copernicus Global DSM.
Красным цветом показаны участки с нулевой высотной отметкой

На следующем этапе была выполнена интерполяция методом кригинга. Поскольку, как было упомянуто выше, исходные данные различаются по плотности, особое внимание уделялось вариограммному анализу – подбору статистической функции, наиболее релевантно описывающей взаимосвязь близлежащих узловых точек (в том числе учитывающей эффекты резко изменяющихся высотных отметок

окружающих точек – Nugget Effect, что является крайне важным для карьеров, отвалов, откосов дамб и т.д.).

По результатам вариограммного анализа в GIS Surfer была подобрана вариограмма, представленная на рис. 6. Удаление тренда и пространственной анизотропии не выполнялось. Ключевые параметры вариограммы представлены в табл. 1.

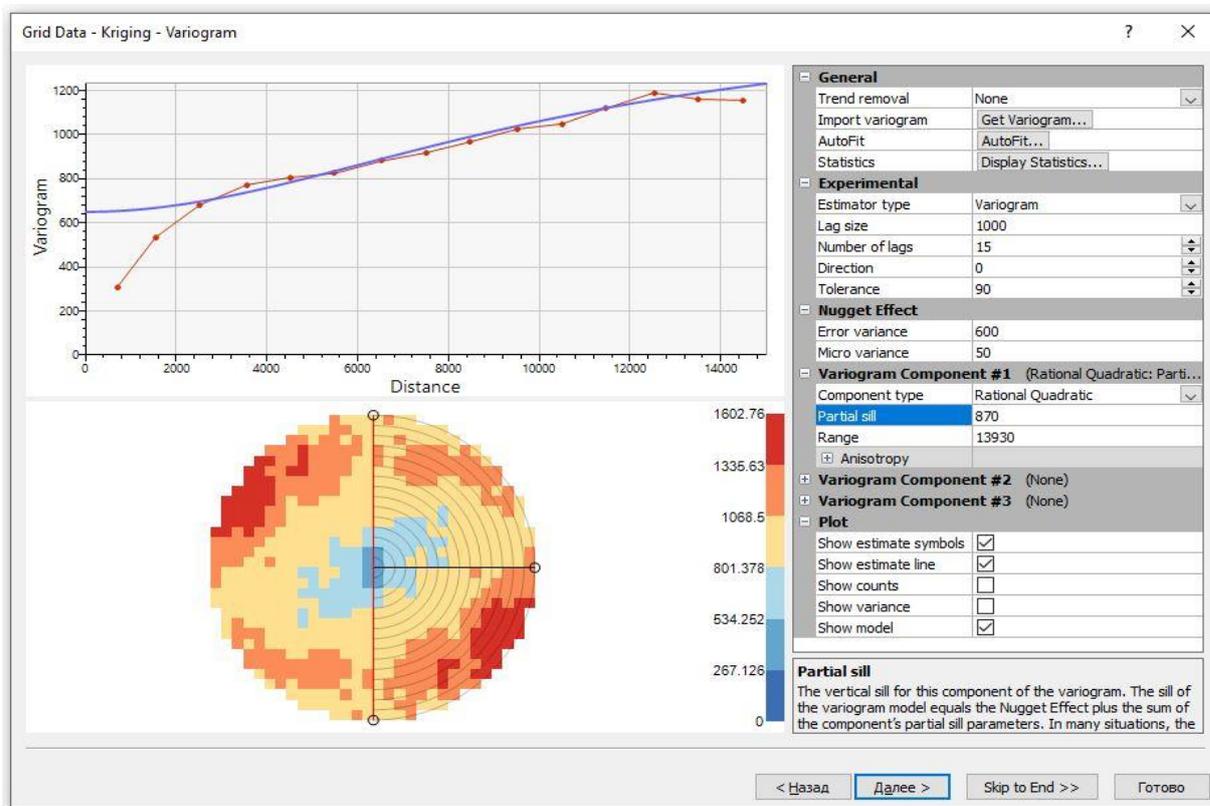


Рис. 6. Вариограммный анализ интерполируемых данных в GIS Surfer

Таблица 1

Параметры вариограммы

Параметр вариограммы	Значение
Вид математической функции	Рациональная квадратичная функция (Rational Quadratic)
Частичный порог (Partial sill)	870
Диапазон (Range)	13930
Размер лага	1000
Число лагов	15
Эффект самородка (Nugget Effect) ошибка вариации / микровариация	учитывается 600 / 50

Результаты исследования

Для оценки качества подобранной вариограммы была выполнена перекрестная проверка интерполируемых данных (рис. 7). Средняя ошибка составила единицы и первые десятки сантиметров, что для ЦМР площадью порядка 420 км² является

совершенно незначительной погрешностью. Таким образом, можно сделать вывод, что вариограммный анализ был выполнен корректно.

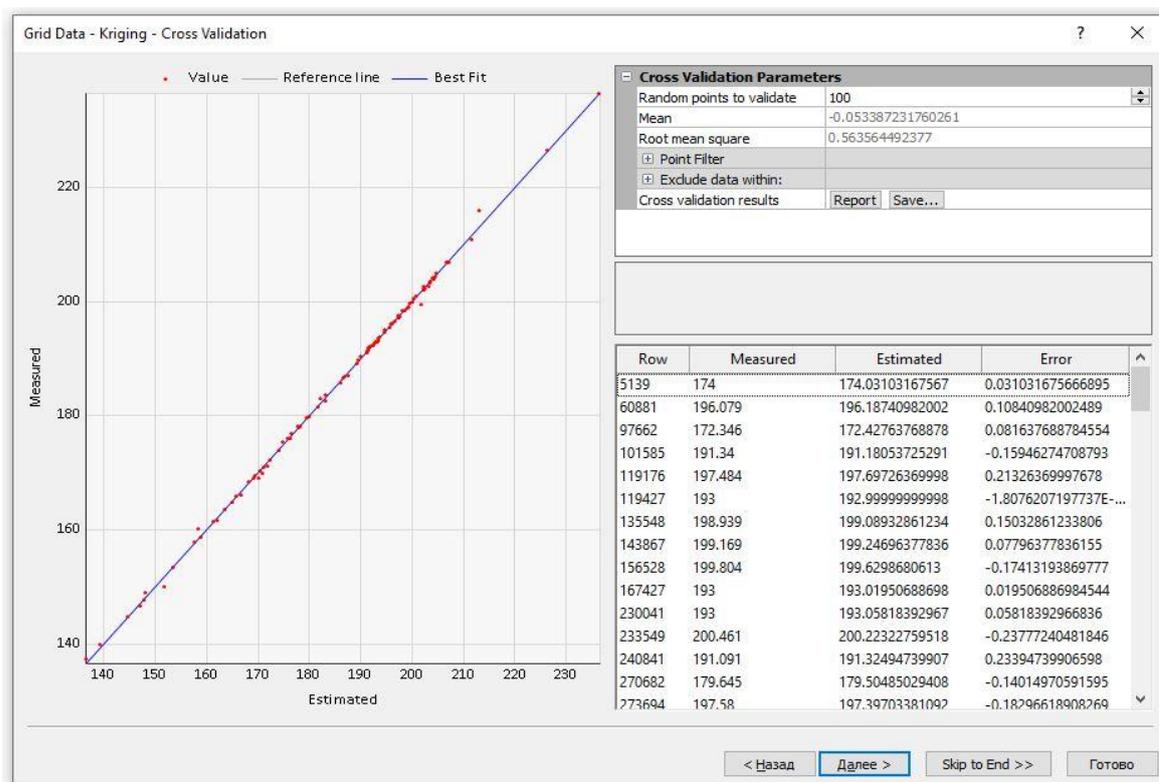


Рис. 7. Перекрестная проверка интерполируемых данных в GIS Surfer

Результирующая ЦМР была также сопоставлена с исходными поверхностями по профилю 1-2 (рис. 8). Как можно заметить, широко применяемая ЦМР по результатам съемки SRTM является устаревшей и недостаточно точно отображает поверхность земли. В то же время использование «сырых» данных ДЗЗ без дополнительной обработки нежелательно, поскольку хорошо заметна микровариация близлежащих высотных отметок – появления «зубьев», что вызвано спецификой радиолокационных съемок [10 – 12]. Трехмерное представление созданной ЦМР представлено на рис. 9.

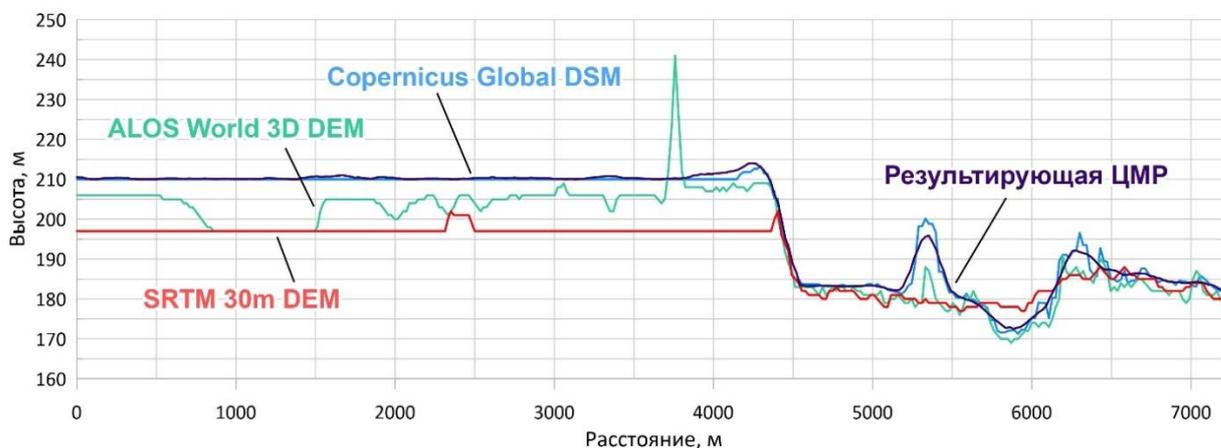


Рис. 8. Сравнение результирующей ЦМР с исходными моделями рельефа по данным ДЗЗ по профилю 1-2

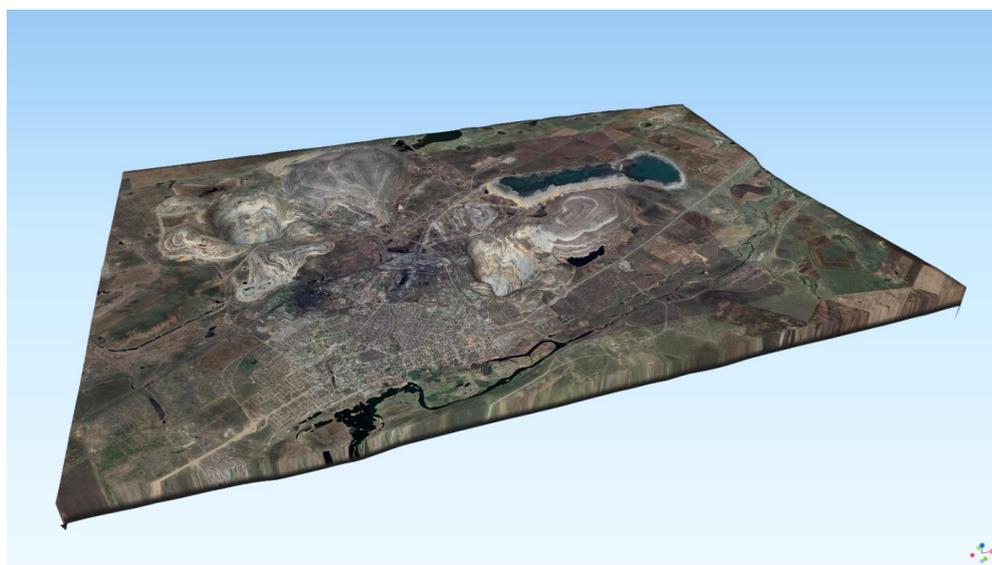


Рис. 9. Объемное представление цифровой модели рельефа Соколовско-Сарбайского месторождения

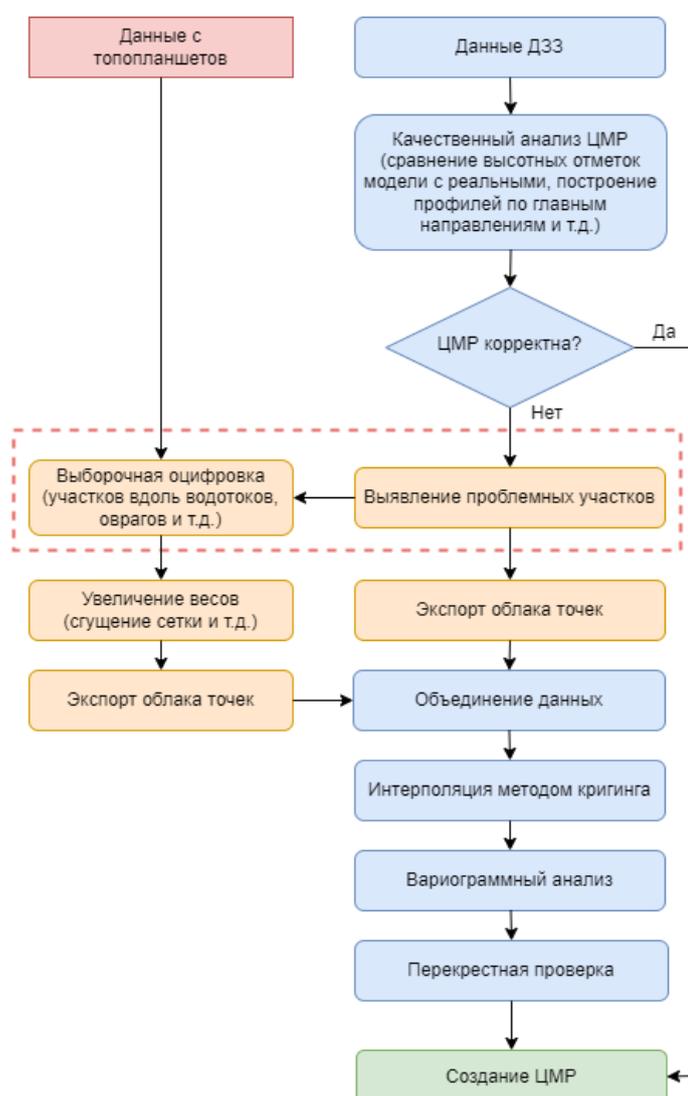


Рис. 10. Методика повышения точности данных ДЗЗ для создания ЦМР

Заключение

В практическом отношении результирующая уточненная ЦМР послужила основой для последующего решения фильтрационных задач, не являвшихся предметом исследования данной статьи: оценки водного баланса территории и влияния хвостохранилища на обводненность шахтного поля. Корректная ЦМР является основой достоверного решения как геофильтрационных, так и геомиграционных задач, позволяет точнее определить балансовые составляющие гидрологического режима.

В ходе подготовки исходных данных геоинформационной системы удалось установить, что не все источники данных ДЗЗ удовлетворяют качеству, необходимому для решения научно-прикладных и инженерных задач в области рудничной гидрогеологии. Для повышения точности ЦМР предлагается использование методики, описанной в данной статье и представленной на рис. 10.

По результатам сравнительного анализа источников ЦМР по данным ДЗЗ в качестве базовой цифровой основы для создания ЦМР была выбрана Copernicus Global DSM как наиболее актуальная и соответствующая требованиям точности. Применение геостатистических методов обработки разнородных исходных данных, представленных в изложенной методике, позволило получить точную модель рельефа территории хвостохранилища и шахтного поля ш. «Соколовская».

Откорректированная ЦМР послужила основой для последующего формирования карт изученности различных типов, позволила установить пространственно-временные зависимости переноса и распределения химических компонентов в грунтовых водах.

Список литературы

1. Лукичев С.В., Наговицын О.В., 2009. Инженерное обеспечение горных работ на основе моделирования объектов и процессов горной технологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S2, С. 196-209.
2. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю., 2021. Анализ качества цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли для рельефа овражно-балочного типа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 235-247. DOI 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235
3. Усанов С.В., Крутиков А.В., Мельник Д.Е., 2018. Обеспечение промышленной безопасности при разработке Соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи. *Проблемы недропользования*, № 4(19), С. 82-89. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082
4. Усанова А.В., Усанов С.В., 2018. Мониторинг сдвижения земной поверхности при разработке Соколовско-Сарбайского месторождения методом радарной интерферометрии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 28-33. DOI 10.15372/FTPRPI20180404. – EDN XZBLPV.
5. Давид М., 1980. *Геостатистические методы при оценке запасов руд*. Ленинград: Недра, 215 с.
6. Демьянов В.В., Савельева Е.А., 2010. *Геостатистика: теория и практика*. Под ред. Р.В. Арутюняна; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. Москва: Наука, 327 с.
7. Li Y., Wang X., Chen Y. et al., 2023. Application of predictor variables to support regression kriging for the spatial distribution of soil organic carbon stocks in native temperate grasslands. *Journal of Soils and Sediments*, No. 23, С. 700–717. DOI: 10.1007/s11368-022-03370-1
8. Bouhout S., Haboubi K., Zian A. et al., 2022. Evaluation of two linear kriging methods for piezometric levels interpolation and a framework for upgrading groundwater level monitoring network in Ghiss-Nekor plain, north-eastern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 15, No. 1016. DOI: 10.1007/s12517-022-10283-3

9. Margaret A., Oliver, Richard W., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 106 с.

10. Agathe N.K.J., Jules T.K., Martial F.E. [et al.], 2024. Combine Landsat 8OLI/TIRS sensors/SRTM image processing and field observations for geological mapping of the Nlonako ring complex (South West of Cameroon Line) under dense forest vegetation and humid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 17, No. 14. DOI: 10.1007/s12517-023-11789-0

11. Trevisani S., Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., 2023. Global digital elevation models for terrain morphology analysis in mountain environments: insights on Copernicus GLO-30 and ALOS AW3D30 for a large Alpine area. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 82, No. 198. DOI: 10.1007/s12665-023-10882-7

12. Jamal S.A., Ali A., 2023. A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, No. 14, P. 45–56. DOI: 10.1007/s43995-023-00014-4.

References

1. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., 2009. Inzhenernoe obespechenie gornyx rabot na osnove modelirovaniya ob"ektov i protsessov gornoj tekhnologii [Engineering support of mining operations based on modeling of objects and processes of mining technology]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S2, P. 196-209.

2. Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu., 2021. Analiz kachestva tsifrovyykh modelei rel'efa na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya rel'efa ovrazhno-balochnogo tipa [Analysis of the quality of digital terrain models based on Earth remote sensing data for gully type terrain]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5-1, P. 235-247. DOI 10.25018/0236_1493_2021_51_0_235

3. Usanov S.V., Krutikov A.V., Mel'nik D.E., 2018. Obespechenie promyshlennoi bezopasnosti pri razrabotke Sokolovskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya podzemnym sposobom v usloviyakh obvodnennoi nalegayushchei tolshchi [Ensuring industrial safety during the development of the Sokolovskoye iron ore deposit by the underground method in conditions of a watered-down stratum]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(19), P. 82-89. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082

4. Usanova A.V., Usanov S.V., 2018. Monitoring sdvizheniya zemnoi poverkhnosti pri razrabotke Sokolovsko-Sarbaiskogo mestorozhdeniya metodom radarnoi interferometrii [Monitoring of the movement of the Earth's surface during the development of the Sokolovsko-Sarbaiskoye field using radar interferometry]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 4, P. 28-33. DOI 10.15372/FTPPI20180404. – EDN XZBLPV.

5. David M., 1980. Geostaticheskie metody pri otsenke zapasov rud [Geostatic methods for estimating ore reserves]. Leningrad: Nedra, 215 p.

6. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A., 2010. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice]. Pod red. R.V. Arutyunyana; Institut problem bezopasnogo razvitiya atomnoi energetiki RAN. Moscow: Nauka, 327 p.

7. Li Y., Wang X., Chen Y. et al., 2023. Application of predictor variables to support regression kriging for the spatial distribution of soil organic carbon stocks in native temperate grasslands. *Journal of Soils and Sediments*, No. 23, P. 700–717. DOI: 10.1007/s11368-022-03370-1

8. Bouhout S., Haboubi K., Zian A. et al., 2022. Evaluation of two linear kriging methods for piezometric levels interpolation and a framework for upgrading groundwater level monitoring network in Ghiss-Nekor plain, north-eastern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 15, No. 1016. DOI: 10.1007/s12517-022-10283-3

9. Margaret A., Oliver, Richard W., 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Switzerland, Cham: Springer International Publishing, 106 p.

10. Agathe N.K.J., Jules T.K., Martial F.E. [et al.], 2024. Combine Landsat 8OLI/TIRS sensors/SRTM image processing and field observations for geological mapping of the Nlonako ring complex (South West of Cameroon Line) under dense forest vegetation and humid climate. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 17, No. 14. DOI: 10.1007/s12517-023-11789-0

11. Trevisani S., Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., 2023. Global digital elevation models for terrain morphology analysis in mountain environments: insights on Copernicus GLO-30 and ALOS AW3D30 for a large Alpine area. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 82, No. 198. DOI: 10.1007/s12665-023-10882-7

12. Jamal S.A., Ali A., 2023. A comparative study of automatic drainage network extraction using ASTER GDEM, SRTM DEM and Cartosat-1 DEM in parts of Kosi basin, Bihar, India. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, No. 14, P. 45–56. DOI: 10.1007/s43995-023-00014-4.