


УДК: 004.942

 10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.23

МЕТОДИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ТРАНСФОРМАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ТЕХНОГЕННО НАГРУЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «КРЕДО АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ»



**Павловский Александр
Илларионович**

Белорусский национальный
технический университет,
Факультет горного дела и
инженерной экологии, Зав. каф.
«Горные работы», к. геогр. наук.,
доцент, Беларусь



**Кологривко Андрей
Андреевич**

Белорусский национальный
технический университет, Декан
факультета горного дела и
инженерной экологии, к.т.н.,
доцент, Беларусь



**Нарыжнова Евгения
Юрьевна**

Белорусский национальный
технический университет,
Факультет горного дела и
инженерной экологии, Кафедра
«Горные работы» Магистр
технических наук,
ст. преподаватель, аспирант,
Беларусь



**Бильдюк Егор
Викторович**

Белорусский национальный
технический университет,
Факультет горного дела и
инженерной экологии, Кафедра
«Горные работы» Магистр
технических наук,
ст. преподаватель, аспирант,
Беларусь

Аннотация. В статье представлен подход к оценке состояния геологической среды в районах открытых горных работ на основе перехода от дискретного геодезического мониторинга к непрерывному математическому моделированию в программном комплексе «КРЕДО Анализ пространственных данных». Рассмотрены принципы построения цифровых моделей рельефа, методы анализа деформаций, оценки устойчивости откосов и объемов перемещения горных масс. Научная новизна заключается в интеграции триангуляционного моделирования, GRID-интерполяции, веб-визуализации и анализа солнечной экспозиции для создания цифровых моделей техногенно нагруженных территорий и прогнозирования геомеханических процессов.

Ключевые слова: КРЕДО АПД, геодезический мониторинг, техногенная нагрузка, открытые горные работы, цифровая модель рельефа (ЦМР), интерполяция, пространственный анализ, геологическая среда, статистическая обработка.

TEKNOLOGIK YUKLANGAN HUDUDLARDA GEOLOGIK MUHITNING TRANSFORMATSIYASINI FAZOVIIY-VAQT TAHLIL QILISH METODIKASI “KREDO FAZOVIIY MA’LUMOTLARNI TAHLIL QILISH” DASTURIY TA’MINOTIDAN FOYDALANGAN HOLDA

**Pavlovskiy Aleksandr
Illarionovich**

Belarus milliy texnika universiteti,
Konchilik va muhandislik
ekologiyasi fakulteti, “Kon ishlari”
kafedrasi mudiri, geografiya fanlari
nomzodi, dotsent, Belarus

**Kologrivko Andrey
Andreyevich**

Belarus milliy texnika universiteti,
Konchilik va muhandislik
ekologiyasi fakulteti dekani, texnika
fanlari nomzodi, dotsent, Belarus

**Naryjnova Yevgeniya
Yuryevna**

Belarus milliy texnika universiteti,
Konchilik va muhandislik
ekologiyasi fakulteti, “Kon ishlari”
kafedrasi, texnika fanlari magistri,
katta o‘qituvchi, doktorant, Belarus

**Bilydyuk Yegor
Viktorovich**

Belarus milliy texnika universiteti,
Konchilik va muhandislik
ekologiyasi fakulteti, “Kon ishlari”
kafedrasi, texnika fanlari magistri,
katta o‘qituvchi, doktorant, Belarus

Annotatsiya. Maqolada ochiq kon ishlari olib boriladigan hududlarda geologik muhit holatini baholashning yangi yondashuvi ko'rib chiqilgan. Ushbu yondashuv geodezik monitoringning diskret ma'lumotlaridan "KREDO Fazoviy ma'lumotlarni tahlil qilish" dasturi yordamida uzluksiz matematik modellashtirishga o'tishga asoslangan. Relyefning raqamli modellarini qurish, deformatsiyalarni tahlil qilish, bortlarning barqarorligini va tog' jinslari hajmining siljishini baholash usullari yoritilgan. Ilmiy yangilik triangulyatsiya, GRID-interpolyatsiya, veb-vizualizatsiya va quyosh ekspozitsiyasi tahlilini integratsiya qilish orqali texnogen yuklangan hududlarning raqamli modellarini yaratish va geomexanik jarayonlarni prognozlash imkoniyatini ta'minlashdan iborat.

Kalit so'zlar: CREDO APD, geodezik monitoring, texnogen yuklama, ochiq kon ishlari, relyefning raqamli modeli (RRM), interpolyatsiya, fazoviy tahlil, geologik muhit, statistik ishlov berish.

METHODOLOGY FOR SPATIOTEMPORAL ANALYSIS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT TRANSFORMATION IN TECHNICALLY IMPACTED AREAS USING THE "CREDO ANALYSIS OF SPATIAL DATA" SOFTWARE

**Pavlovskiy Aleksandr
Illarionovich**

Belarusian National Technical University, Faculty of Mining and Engineering Ecology, Head of the Department of Mining, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Belarus

**Kologrivko Andrey
Andreevich**

Belarusian National Technical University, Dean of the Faculty of Mining and Engineering Ecology, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarus

**Naryjnova Yevgeniya
Yuryevna**

Belarusian National Technical University, Faculty of Mining and Engineering Ecology, Department of Mining, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, PhD Student, Belarus

**Bildyuk Yegor
Viktorovich**

Belarusian National Technical University, Faculty of Mining and Engineering Ecology, Department of Mining, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, PhD Student, Belarus

Abstract. The article presents an approach for assessing the state of the geological environment in open-pit mining areas based on the transition from discrete geodetic monitoring to continuous mathematical modeling using the CREDO Spatial Data Analysis software. The principles of digital terrain modeling, deformation analysis, slope stability assessment, and volume calculation of displaced rock masses are described. The scientific novelty lies in integrating triangulation, GRID interpolation, web visualization, and solar exposure analysis to create digital models of technogenically disturbed areas and to improve geomexanical hazard prediction.

Keywords: CREDO APD, monitoring, technogenic load, open-pit mining, digital elevation model, interpolation, spatial analysis.

Введение. Открытая добыча полезных ископаемых неизбежно приводит к формированию экстремальных техногенных нагрузок на геологическую среду. Процесс существенного изменения геометрии земной поверхности, выраженный в создании глубоких карьерных выемок и масштабных насыпных отвалов, провоцирует коренное перераспределение напряжений в литосфере. Подобные трансформации требуют внедрения систем высокоточного мониторинга, способных фиксировать даже незначительные подвижки массива. Актуальность исследования обусловлена необходимостью интеграции данных наземных геодезических измерений и материалов дистанционного зондирования с беспилотных летательных аппаратов в единую

аналитическую систему, предназначенную для оперативного прогнозирования чрезвычайных ситуаций геомеханического характера.

Материалы и методы. Математический фундамент моделирования в программном комплексе «КРЕДО Анализ пространственных данных» (далее — КРЕДО АПД) базируется на решении задачи аппроксимации нерегулярно расположенных точек мониторинга. В рамках проведенного исследования для построения цифровых моделей различными методами интерполяции в среде КРЕДО АПД был задействован массив, включающий около 10 тысяч точек.

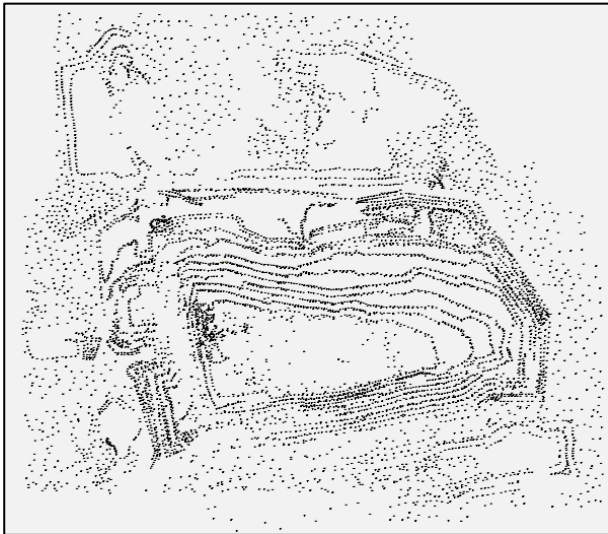


Рис.1. Отображение исходного массива точек территории до применения методов интерполяции.

Одной из ключевых особенностей работы с объектами открытых горных работ является наличие резких перегибов рельефа, таких как бровки и подошвы уступов. В отличие от упрощенных методов интерполяции, алгоритмы КРЕДО АПД реализуют построение цифровых моделей на основе триангуляции (TIN) с обязательным учетом структурных линий. Данный подход позволяет сохранить геометрию физически значимых граней объекта и исключить математическое сглаживание элементов рельефа, что напрямую влияет на точность оценки устойчивости бортов в условиях высокой техногенной нагрузки.

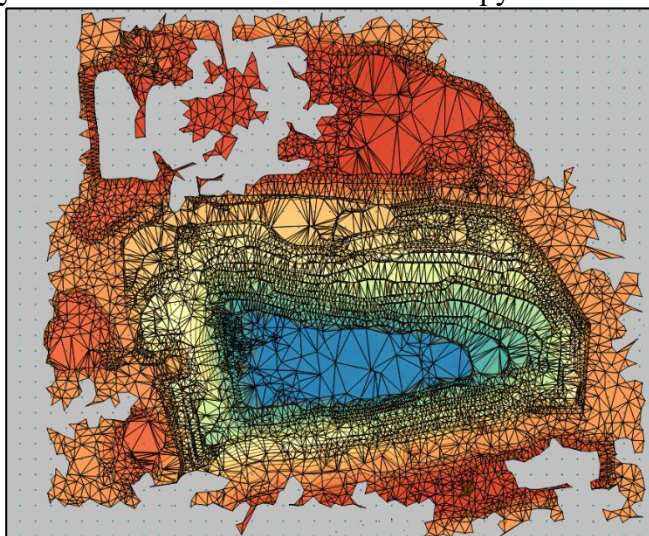


Рис.2. Цифровая модель поверхности (TIN), построенная по массиву из 10 000 точек.

Данный подход позволяет сохранить геометрию физически значимых граней объекта и исключить математическое сглаживание элементов рельефа, что напрямую влияет на точность оценки устойчивости бортов.

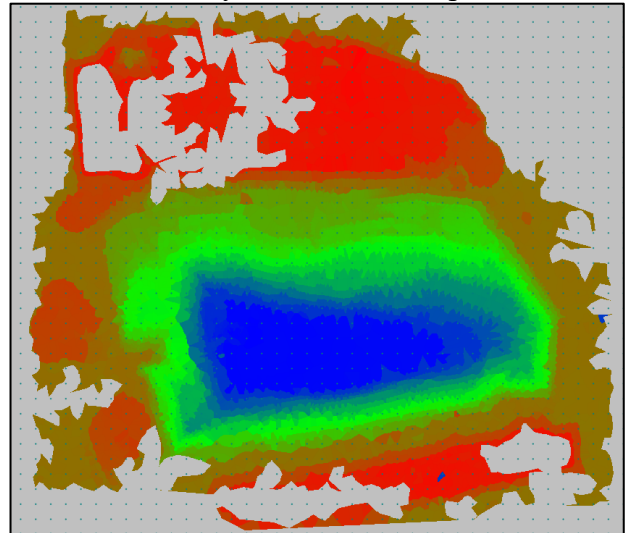


Рис.3. Цифровая модель поверхности, построенная на основе метода Nearest Neighbor (Ближайший сосед).

Для последующего глубокого статистического анализа данные преобразуются в регулярную сетку (GRID). Значение в каждом узле такой матрицы рассчитывается методом взвешенной интерполяции, что позволяет сформировать статистически однородное поле для сопоставления временных циклов наблюдений и выявления динамики изменений в геологической среде. Обоснование точности моделей реализуется через расчет средней квадратической ошибки, а функционал программы обеспечивает автоматическую генерацию карт отклонений, позволяя исследователю выявлять грубые ошибки измерений и исключать их из анализа техногенного воздействия.

Центральным инструментом пространственно-временного анализа выступает дифференциация поверхностей. Путем математического вычитания цифровых моделей разных лет формируется карта разностей, визуализирующая зоны аккумуляции массы (насыпные отвалы) и зоны дефицита массы (карьерные выемки). Использование метода призм в «КРЕДО АПД» позволяет рассчитывать объемы

перемещенных горных масс с точностью, значительно превосходящей традиционные профильные сечения. Параллельно с вертикальными смещениями программа позволяет проводить расчет градиентов поверхности, на основе которых строятся карты критических углов наклона.

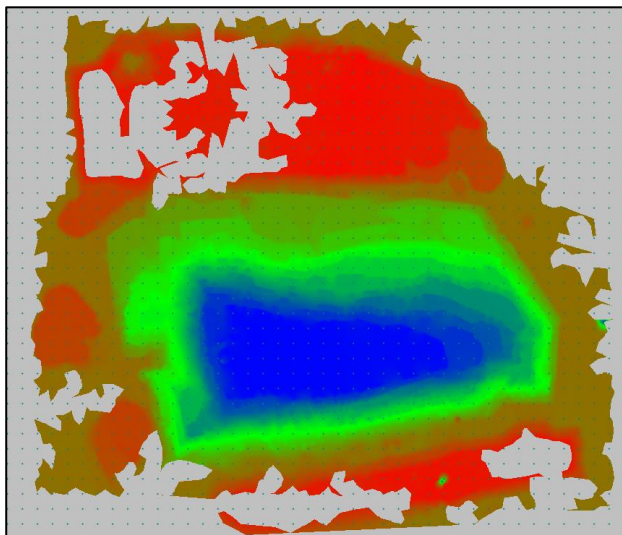


Рис.4. Цифровая модель поверхности, полученная с использованием алгоритма интерполяции *Natural Neighbor* (Естественный сосед).

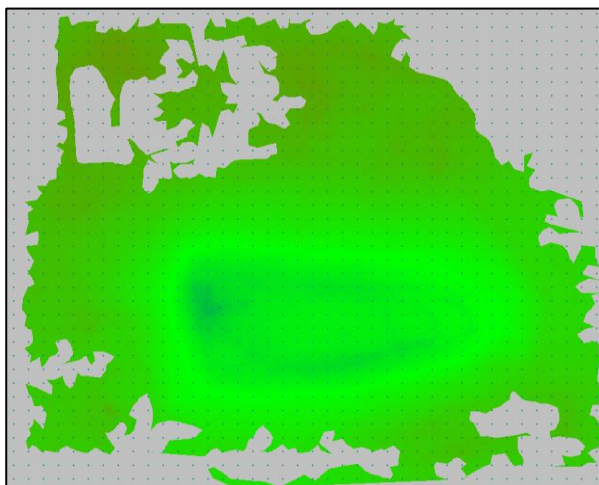


Рис.5. Цифровая модель поверхности, построенная с применением метода *Inverse Distance Weighting* (Обратные расстояния).

Существенным дополнением к анализу устойчивости является возможность оценки солнечной экспозиции бортов карьера. Учитывая географическое положение объектов (например, карьер «Микашевичи»), рас-

положенных севернее экватора, инсоляция распределяется неравномерно. Настройка 3D-освещения в «КРЕДО АПД» позволяет моделировать положение солнца в разное время суток (западное, южное направление) и оценивать степень прогрева склонов.

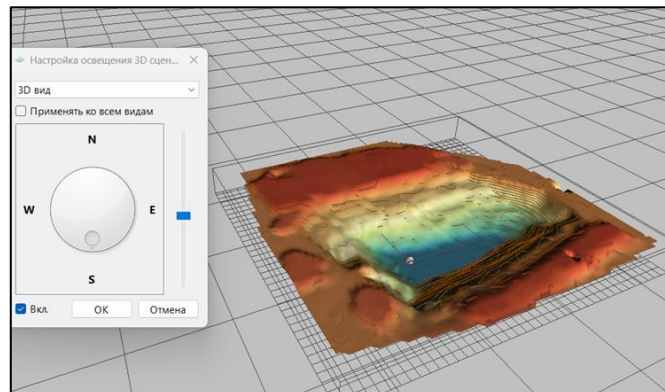


Рис.6. Модель освещенности бортов карьера при южном направлении источника освещения.

Установлено, что северный борт карьера, получая больше прямого солнечного воздействия, быстрее подвергается просушке, в то время как южный борт дольше остается в тени, что способствует его избыточному обводнению.

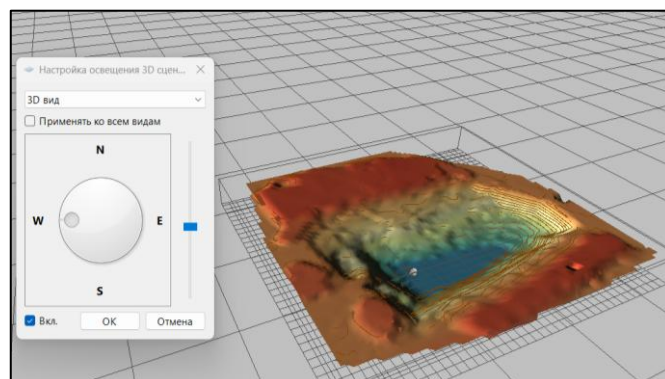


Рис.7. Модель освещенности бортов карьера при западном направлении источника освещения.

Интеграция данных по солнечной экспозиции с картами градиентов позволяет более точно прогнозировать участки, подверженные риску сползания из-за переувлажнения грунтов.

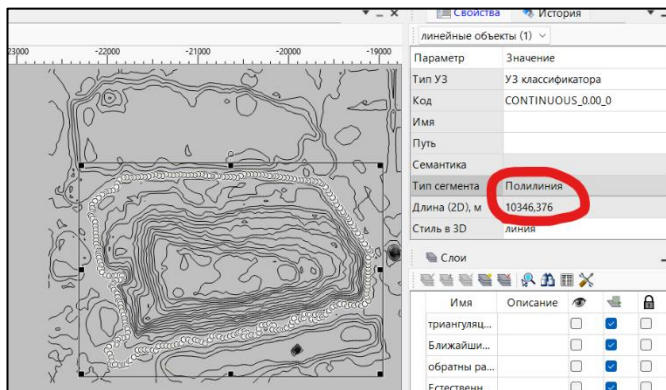


Рис.8. Пример выделения полилинии с демонстрацией определения ее длины.

Дополнительным инструментом анализа является возможность импорта DXF-файлов, содержащих геометрические элементы карьера. После импорта пользователь может выделять отдельные полилинии и выполнять измерение их длины непосредственно в программной среде. Это позволяет использовать цифровые контуры уступов, берм и других структурных элементов для количественного анализа геометрии объекта. Ключевой особенностью системы является возможность работы с полилиниями непосредственно в ее среде. Это избавляет от типичных для многих программ ограничений и позволяет связать геомет-

рические параметры с аналитикой. На рисунке 8 продемонстрирован этот процесс: выбор конкретной линии и расчет ее протяженности, что необходимо для оценки параметров структурных элементов карьерного рельефа.

Заключение. Резюмируя, можно сказать, что использование «КРЕДО АПД» дает преимущество по времени, не жертвуя при этом точностью вычислений. Сочетание регулярных матриц и анализа инсоляции (солнечного освещения) дает возможность фиксировать микродеформации порядка 5–10 мм., что позволяет более гибко учитывать климатические риски и повышать общую безопасность ведения горных работ. Предложенная методика является фундаментом для создания «цифровых двойников» месторождений, обеспечивая комплексный подход к мониторингу геологической среды и безопасности техногенно нагруженных территорий.

Исследования выполнены в рамках реализации проекта БРФФИ–МИРРУ № X25УЗБ-054 «Особенности обеспечения геологической безопасности техногенно нагруженных территорий в процессе разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом» на 2025–2027 гг.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] КРЕДО-Диалог. (2024). КРЕДО АПД. Анализ пространственных данных: руководство пользователя. Минск: Кредо-Диалог.
- [2] Заиров, Ш. Ш., Номдоров, Р. У., Бильдюк, Е. В., & Олимов, Ф. М. (2024). Способ повышения устойчивости бортов карьера путем формирования вогнутого профиля откоса высокого уступа. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 2(S4-1), 37–41. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.2.4-1.2024.15>
- [3] Кузьмин, Ю. О. (2014). Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2), 401–443.
- [4] Кузьмин, Ю. О. (2014). Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени. *Геодинамика и тектонофизика*, 5(2), 401–443.