

УДК 622.148

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИЖЕНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ АТАСУ

Ф. К. Низаметдинов¹, А. К. Сатбергенова², Д. С. Ожигин¹,
Б. Резник³, Р. Ф. Низаметдинов¹

¹Карагандинский технический университет,
просп. Н. Назарбаева 56, 100000, г. Караганда, Казахстан

²Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,

E-mail: a.satberganova2@gmail.com, просп. Аль-Фараби, 71, 050040, г. Алматы, Казахстан

³Берлинский технический университет прикладных наук,
Люксембургерштрассе 10, 1013353 г. Берлин, Германия

Представлена геомеханическая мониторинговая система земной поверхности горного отвода территории Атасуйского железорудного месторождения. Изучено фактическое состояние подработанной земной поверхности с применением аэрофотограмметрической съемки с помощью беспилотного летательного аппарата. Определены очаги зарождения деформации земной поверхности на основе независимых измерений в пределах созданного временного опорного полигона, закоординированного ГНСС-измерениями. Выполнено высокоточное геометрическое нивелирование по металлическим реперам, заложенным в виде трех профильных линий по простиранию и вкрест простирания рудных тел с целью выявления процесса сдвижения горного массива от ведения подземных горных работ.

Атасуйское месторождение, аэрофотосъемка, геометрическое нивелирование, смещения земной поверхности, опорные знаки и реперы, трехмерная модель земной поверхности

DOI: 10.15372/FTPRPI20240319

EDN: RPFPAUK

Разработка железорудного Атасуйского месторождения началась более 60 лет назад вначале открытым, а затем и подземным способом. Образованные отвалы занимают значительные площади и размещены у южного и западного бортов карьера, а также южнее промплощадки станции Карьерная. Подземный рудник введен в эксплуатацию в 1972 г. с проектной мощностью 2.2 млн тонн руды в год. На промышленной площадке действуют Центральный, Восточный и Восточно-вентиляционный стволы и принята этажно-камерная система разработки.

В настоящее время земная поверхность в районе горного отвода на территории месторождения железных и железомарганцевых руд подвержена деформациям в связи с активной подземной разработкой [1]. Горнотехнические условия разработки рудной залежи осложнены часто изменяющимися геометрическими параметрами рудного тела как по падению, так и по простиранию и многочисленными геологическими нарушениями. Рудное тело, подлежащее отработке, представлено мощной пластообразной залежью железных и железомарганцевых руд.

Марганцевые руды имеют среднюю мощность 6–8 м и залегают в почве железных руд. Угол падения их меняется от 0 до 90°. Руды и вмещающие породы крепкие, представлены известняками, окремненными и гематизированными известняками и карбонатными породами.

Вес отвальной массы приводит к дополнительным деформациям земной поверхности с возможным образованием воронкообразных провалов при ведении подземных горных работ. Активная подземная разработка месторождения ведется вблизи населенного пункта, что обуславливает необходимость проведения мониторинга за подработанными территориями [2, 3]. На рис. 1 представлен совмещенный план рудного тела с расположением наблюдательных станций в виде трех профильных линий [4].

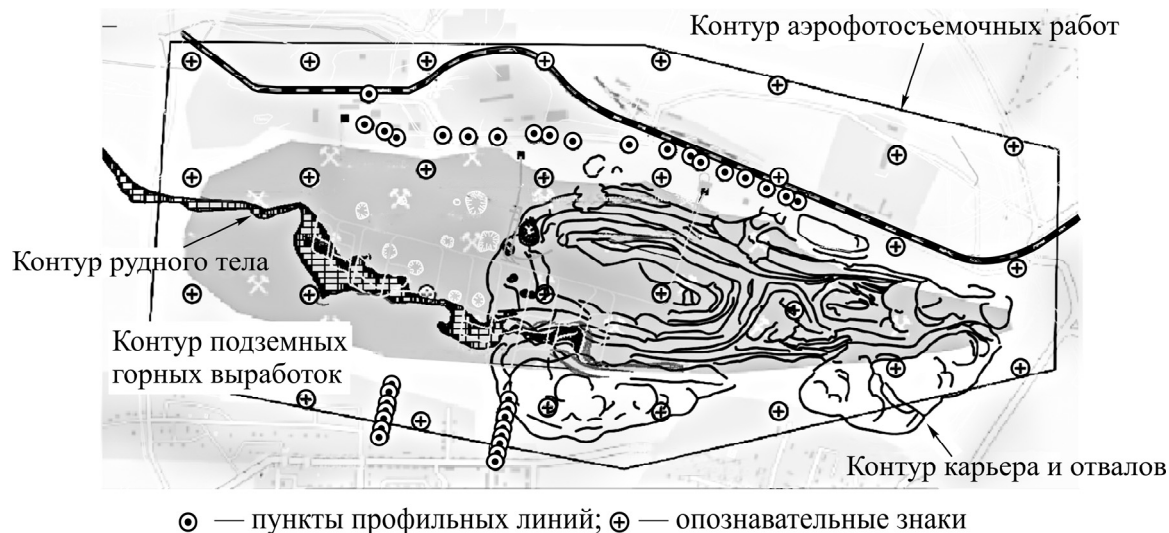


Рис. 1. Совмещенный план земной поверхности с контуром рудного тела, опознавательными знаками и закрепленными пунктами на трех профильных линиях

С целью контроля образования новых воронкообразных провалов, учитывая значительную протяженность объекта и сложный техногенный рельеф отвалов, а также для повышения безопасности ведения подземных горных работ разработан специальный метод исследования с помощью аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Mavic 2 Pro с высокоточным бортовым ГНСС-приемником [5–8]. Установленный бортовой ГНСС-приемник позволяет определять положение дрона в воздухе в момент фотографирования с сантиметровой точностью и является мультисистемным и мультичастотным.

Для проведения аэрофотосъемочных работ создан проект расположения опознавательных знаков. На площади 327 га запроектировано равномерное размещение 30 опознавательных знаков (рис. 1) для повышения точности привязки моделей по всему периметру объекта. Опознавательные знаки, закрепленные на местности, имеют контрастирующий с местностью цвет с четко различимым центром для ускорения камеральной обработки при создании цифровой модели местности. Для осуществления выноски опознавательных знаков их проектные координаты загружаются в память ровера. Для работы использовался комплект геодезического оборудования Leica GS14. После выноски опознавательных знаков проводится определение координат их центров при помощи ГНСС-оборудования с погрешностью 10–15 мм. Все измерения для определения пространственного положения центров опознавательных знаков выполняются в дифференциальном режиме [6–8]. Перед проведением аэрофотосъемки составлен проект полетного задания в программном обеспечении DJI GS Pro со следующими параметрами: продольное перекрытие 80 %, поперечное 70 %; скорость полета 10 м/с, площадь полета 327 га.

Максимальное разрешение фотоматериалов для составления топографического плана при проведении аэрофотосъемок земной поверхности Атасуйского месторождения при высоте полета 245 м составило 5.72 см/пиксель (рис. 2).

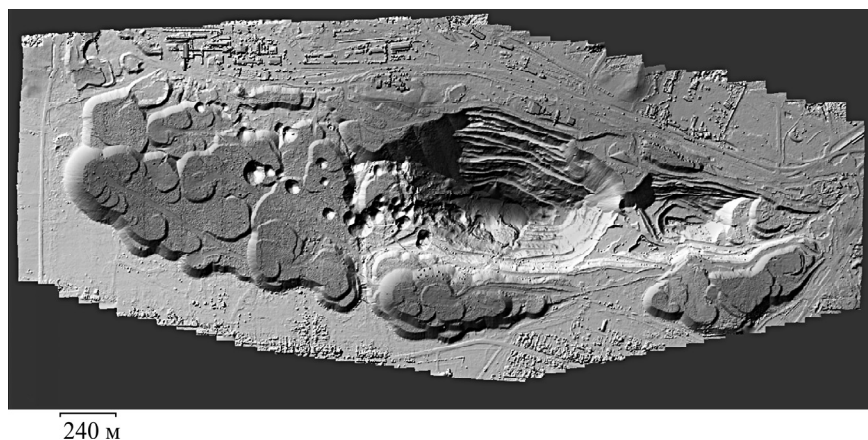


Рис. 2. Цифровая модель дневной поверхности в зоне воздействия подземных взрывных работ в пределах горного отвода

В программном обеспечении Agisoft Metashape Professional создана карта высот, рассчитанная на основании плотного облака точек, что позволило подробно изучить изменение состояния земной поверхности подработанной территории [8 – 13]. Цифровая модель местности участка карьера получена с разрешением 9.4 см/пиксель, плотностью — 113 точек/м². На рис. 3 показана совмещенная цифровая модель рельефа, на которой видны участки поднятия и опускания земной поверхности.

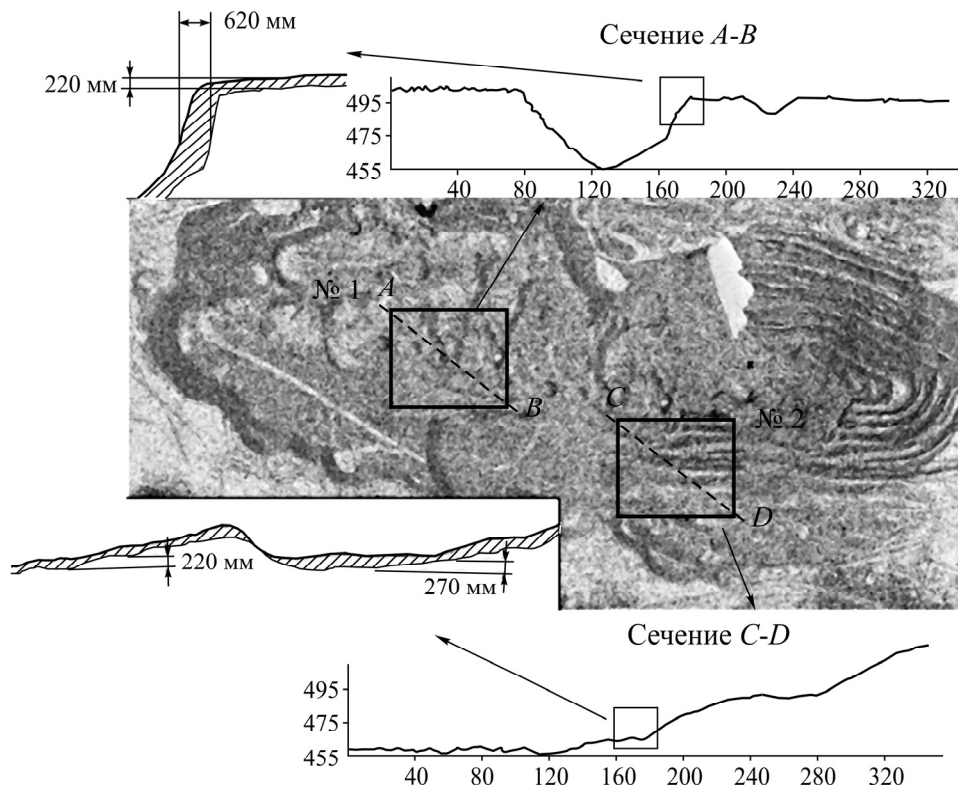


Рис. 3. Построение сечений по зонам активных деформаций № 1 и № 2 на совмещенной цифровой модели рельефа

При обследовании территории определены характерные участки № 1 и № 2, по которым вручную построены сечения рельефа $A-B$ протяженностью 333.7 м и $C-D$ протяженностью 352 м (рис. 3). Полученные графики совмещены по высотным отметкам, где оседания по вертикали составляют в сечении $A-B$ до 220 мм, а в сечении $C-D$ от 220 до 270 мм. В сечении $A-B$ обнаружено горизонтальное изменение рельефа, равное 620 мм, что свидетельствует об увеличении радиуса образованной воронки. Однако данный способ имеет ряд недостатков, таких как слабая информативность, длительный и трудозатратный процесс по построению и совмещению сечений рельефа.

Для более глубокого анализа полученных цифровых моделей разработан алгоритм автоматизированного вычисления разности поверхностей двух аэрофотосъемок. Построение сетки GRID позволяет упорядочить расположение точек, принадлежащих плотному облаку точек, строго по ячейкам в условной системе координат $(x_n; y_n)$. Каждая упорядоченная точка соответствует порядковому номеру по строке (x_n) и по столбцу (y_n) , что дает возможность сравнивать изменение по высоте $\Delta h = h_{n+1} - h_n$ положение точки [14]. Анализ сетки GRID проводился по 5 млн точек на рассматриваемой территории. Полученные значения Δh в контрастном цвете выстраивались в виде карты высот, где выделены зоны напряженного состояния горного массива (рис. 4).

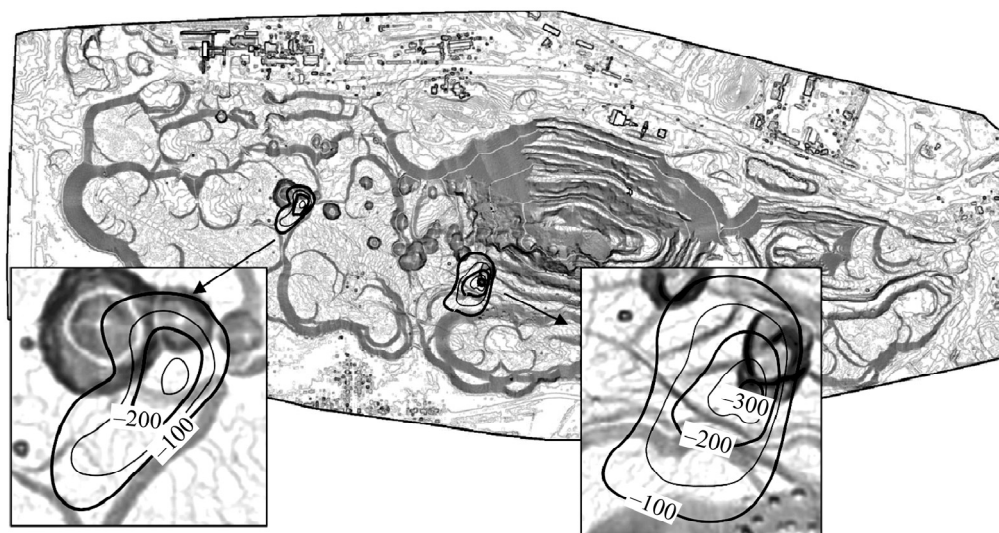


Рис. 4. Совмещенная карта высот с результатами определения вертикальных смещений Δh (высота сечения изолиний 50 мм)

На карте высот изолинии, подтверждающие оседание рельефа, получены с помощью сопоставления двух цифровых моделей. Оседания земной поверхности происходят в зоне воронкообразных провалов, которые при визуальном осмотре не обнаруживаются. Скорость оседаний отдельных участков составляет 19 мм/сут.

Для детального изучения деформации земной поверхности с помощью высокоточного геометрического нивелирования исследование земной поверхности на промышленной площадке дополнительно проводилось по заложенным трем профильным линиям. На территории, подверженной деформационным процессам, связанным с подземной отработкой, создана нивелирная сеть специального назначения по заложенным глубинным реперам для проведения геометрического нивелирования II класса с целью выявления деформаций на ранней стадии [15, 16]. Реперы наблюдательных станций заложены по прямым профильным линиям (рис. 5): 1-1 — вдоль руд-

ного тела; включает 19 реперов с опорной привязкой к местному тригопункту “Карьер”. Линии 2-2 и 3-3 заложены вкрест залегания рудного тела; включают 14 реперов. По ним определялись параметры процесса сдвижения и деформаций земной поверхности и горного массива, позволяющие своевременно выявить опасные зоны, а также разработать мероприятия по обеспечению безопасного ведения рекультивационных работ на подрабатываемой территории.



Рис. 5. План земной поверхности с профильными линиями: (1-1) — по простиранию рудного тела; (2-2) и (3-3) — вкрест простирания рудного тела

Конструкции реперов, способы их закладки и порядок разбивки наблюдательной сети осуществлялись в соответствии с инструкцией [4]. Геометрическое нивелирование II класса выполнялось в прямом и обратном направлении. Согласно методике проведения высокоточного нивелирования с целью определения деформаций и сдвижений земной поверхности, использовались цифровой нивелир Leica DNA03, штриховые инварные рейки, нивелирные башмаки, позволяющие значительно повысить производительность работ. Уникальное считывающее электронное устройство в цифровом нивелире применялось для снятия и записи отчета по специальным штрихам инварных реек с необходимой точностью. Автоматическое вычисление превышений исключало погрешность их определения в случае снятия отчетов по рейке при обычном использовании оптических приборов. Кроме того, прибор фиксировал расстояние до рейки и указывал на разницу плеч в случае превышения допустимого значения. При нивелировании II класса максимальное неравенство плеч на станции составляло 0,2 м, максимальное накопление по секциям — 0,4 м.

Цифровой нивелир Leica DNA03 имеет алфавитно-цифровую клавиатуру с подсветкой, интерактивное меню, отображающее текущую информацию об отчетах с инварных реек. Полученные данные сохраняются автоматически во внутренней памяти прибора с возможностью записи большого количества данных, которые переносятся на флеш-карту PCMCIA и вносятся для обработки на персональный компьютер. Данные нивелирования обрабатывались в программном комплексе Leica Geo Office. Дополнительные модули программы содержат функции вычисления и уравнивания отметок реперов профильных линий, используемых в дальнейшем при составлении отчетов.

При нивелировании применялись штриховые инварные рейки GPCL2 в виде цельной нескладывающейся односекционной конструкции из алюминия. В середине конструкции — металлическая полоса из прочного сплава с низким коэффициентом температурного расширения, на которую нанесены штрихи. Расстояние между осями штрихов 5 мм. Рейки снабжены

круглыми уровнями с ценой деления $10 - 12' / 2$ мм для установки в отвесное положение. Над промежуточными точками размещался геодезический башмак Leica GLUS1 — для исключения ошибки установки инварной рейки и для сохранности основания рейки [4]. Сумма невязок распределялась пропорционально расстоянию между реперами.

Вертикальные оседания по профильным линиям на отдельных реперах получены в пределах от 0 до 4.0 мм. Значения оседаний находятся в пределах допуска (таблица).

Характеристика нивелирных ходов по первой и второй серии наблюдений за реперами профильных линий

Номер профильной линии	Количество станций	Невязки, мм	
		полученные	допустимые
1-1	18	5.82 / 5.87	5.92 / 5.92
2-2	6	0.60 / 0.20	2.12 / 2.12
3-3	6	1.92 / 1.84	2.12 / 2.12

Примечание. Через косую линию приведены данные для первой и второй серии наблюдений

ВЫВОДЫ

Разработана геомеханическая мониторинговая система земной поверхности территории Атасуйского месторождения, включающая аэрофотограмметрические съемки с использованием беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) для получения данных о фактическом состоянии земной поверхности и карьерного поля с рекультивационными работами, а также временного опорного полигона, закоординированного ГНСС-измерениями. Получены предварительные результаты по проведенным сериям наблюдений за сдвижением земной поверхности, позволившие выявить вертикальные смещения в пределах от -220 до -270 мм.

Разработан алгоритм автоматизированного вычисления разности поверхностей двух аэрофотосъемок, упорядочивший расположение точек с использованием условной сетки GRID строго по ячейкам для анализа оседаний земной поверхности.

Заложена инструментальная основа для получения исходных данных с помощью цифрового нивелира в виде металлических реперов на земной поверхности исследуемой территории. Проведено высокоточное геометрическое нивелирование II класса по реперам, заложенным по профильным линиям с учетом пространственного расположения рудных тел с целью выявления процесса сдвижения земной поверхности от ведения подземных горных работ.

Авторы благодарят В. Д. Барышникова, С. П. Оленюка и М. Б. Игемберлину за внимание к работе и содействие в оформлении материала статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байбатша А. Б. Геология месторождений полезных ископаемых. — Алматы: КазНТУ, 2008. — 368 с.
2. Ren H., Zhao Y., Xiao W., and Hu Zh. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. Int. J. Coal. Sci. Technol., 2019, Vol. 6. — P. 320–333.
3. Низаметдинов Ф. К., Барышников В. Д., Жанатулы Е., Нагибин А. А., Туякбай А. С., Низаметдинов Н. Ф., Естаева А. Р. Обоснование и выбор расчетных параметров прочностных свойств горных пород для оценки устойчивости бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 31–37.
4. Центры и реперы Государственной геодезической и нивелирной сетей Республики Казахстан ГКИНП (ГНТА)-19-024-09. — Астана, 2009. — 46 с.

5. Kassymkanova K. M., Jangulova G.K., Issanova G., Turekhanova V., and Zhalgasbekov Y. Geomechanical processes and their assessment in the rock massifs in central kazakhstan, Springer, Cham, 2020. Exomorphogenesis of cosmogenic cyclic structures of Kazakhstan. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-33993-7>
6. Shults R., Ormambekova A., Medvedskij Y., and Annenkov A. GNSS-assisted low-cost vision-based observation system for deformation monitoring, Appl. Sci., 2023, Vol. 13, 2813.
7. Shults R., Kassymkanova K.M., Burlibayeva Sh., Skopinova D., Demianenko R., and Medvedskiy Y. UAV monitoring of excavation works — 11th Int. Conf. Environmental Engineering, Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 21 – 22 May 2020.
8. Шпаков П. С., Ожигин С. Г., Ожигина С. Б., Мусина Г. А., Бактыкереев М. К. Совершенствование процесса инженерного проектирования на основе применения технологий ВІМ и БПЛА // Вестн. АГА. — 2022. — № 3 (26). — С. 8 – 14.
9. Ozhygin D., Šafař V., Dorokhov D., Ozhygina S., Ozhygin S., and Staňková H. Terrestrial photogrammetry at the quarry and validating the accuracy of slope models for monitoring their stability, IOP Conference Series: Earth and Env. Sci., 2021, 906(1). — 012062.
10. Mozer D. V., Tuyakbai A. S., and Toleubekova Z. Z. State of the undermined Karaganda Coal Basin area by satellite monitoring data, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53. — P. 389 – 395.
11. Хмелинин А. П., Барышников В. Д., Неверов А. А., Щукин С. А., Васичев С. Ю. Опыт применения цифровых геомеханических моделей при освоении рудных месторождений Сибири // Горн. пром-сть., 2023.
12. Kassymkanova K. K., Istekova S., Rysbekov K., Soltabayeva S., and Dossetova G. Improving a geophysical method to determine the boundaries of ore-bearing rocks considering certain tectonic disturbances, Mining of Mineral Depositsthis link is disabled, 2023, Vol. 17(1). — P. 17 – 27
13. Bekbergenov D., Jangulova G., Kassymkanova K.-K., and Bektur B. Mine technical system with repeated geotechnology within new frames of sustainable development of underground mining of caved deposits of the Zhezkazgan field Geodesy and Cartography (Vilnius) this link is disabled, 2020, Vol. 46 (4). — P. 182 – 187.
14. Электронный справочник MapТек <http://surl.li/rzebl>
15. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — М., 2004.
16. Алпыспаева Ж. А., Пархоменко Н. А., Пронина Л. А., Сатбергенова А. К. Оптимизация методов геодезического обеспечения строительства автомобильных дорог в условиях северного Казахстана // Вестн. КазНУ. Серия географическая. — 2023. — Т. 69. — № 2. — С. 50 – 59.

Поступила в редакцию 26/I 2024

После доработки 04/IV 2024

Принята к публикации 17/V 2024