

УДК 551.435.16

DOI: 10.30987/article_5bf3cb5060c3a4.53131692

А.В. Флоров

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрена проблема оценки возможностей применения беспилотных авиационных технологий для мониторинга опасных геологических процессов открытых горных выработок. Обоснована необходимость внедрения современных инфор-

мационных технологий для обеспечения безопасности на открытых горных выработках.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, мониторинг, карьер, оползневые деформации, ЦМР, БЛА, ГИС.

A.V. Florov

PREDICTION OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT IN OPEN MINE WORKING USING INFORMATION TECHNOLOGIES

The purpose of the work consists in the assessment of potentialities to use drone technologies for monitoring hazardous geological processes in open mine workings. This kind of monitoring will allow obtaining rapidly data on stability of open pit sides and also predicting their dynamics and besides increasing the economic efficiency of investigations at the expense of process automation and data complex use. A synergetic effect will allow carrying out investigations, design and prediction and also planning the output of rocks with the works constant control support. The industrial process automation based on digital models of the relief will allow using natural resources in the most efficient way and also ensure a proper safety at work objects. Under conditions of digital economy development the digitization of open mine workings space changing in a dynamic way is one of the problems specified which can be already solved by means of the optimization of existing common methods of mine surveying. At that new technologies introduction does not require highly skilled workers and complexes

used for landscape digitization based on drone use are comparable at costs with ground surveying equipment which is used for the prediction of the development of hazardous geological processes in open mine workings. The methodical experiment carried out at a mining-processing enterprise allowed revealing hazardous geological processes which were not detected in the course of a long period of monitoring with common methods of supervision.

The investigation methods used in the work are based on the analysis of available methods of monitoring and potentialities of modern techniques. Furthermore, there was carried out a methodical experiment with the participation of the representatives of a mining company and an investigation group led by the author. The investigation results shown in the paper prove actually the necessity to introduce modern information technologies to ensure safety in open mine workings.

Key words: hazardous geological processes, monitoring, open-cast mine, landslide deformations, CMW, drone, SIS.

Введение

Добыча полезных ископаемых является трудоёмким и потенциально опасным производством. При проектировании горных выработок, а также по мере их дальнейшей эксплуатации необходимо проводить тщательные геоморфологические, гидрогеологические исследования. Мониторинг состояния масс породы как внутри горной выработки, так и по её периферии связан не только с экономическими аспектами, но и с требованиями к безопасности. Изменения ландшафта, связанные с изъятием вскрышных горных пород в одном месте и складированием их в виде отвалов

в другом, влекут неизбежные деформации на откосах. Породные отвалы рассматриваются как зоны с повышенным риском возникновения опасных геологических процессов, при этом оказывающие отрицательное влияние на компоненты окружающей природной среды. В связи с этим целесообразно осуществлять мониторинг породных отвалов не только путём проведения традиционной наземной съёмки, но и с применением современных методов дистанционного зондирования, включая беспилотные технологии [1].

Методы маркшейдерского обеспечения горных работ

Деятельность открытых горных выработок невозможна без маркшейдерского обеспечения горных работ. Подготовка высококвалифицированных кадров для данной отрасли остается одной из приоритетных задач в России. Утрата позиций в прикладной науке в переходный период, а также применение устаревшего оборудования для проведения научных исследований по существующим направлениям и развитие перспективных исследований требуют новых подходов и новых технологий.

Так как комплексные инженерные изыскания трудозатратны и требуют высокой квалификации сотрудников, наличия дорогостоящего оборудования и специализированного программного обеспечения (ПО), зачастую изыскательские работы проводятся в недостаточном объеме или не отвечают качественным требованиям [2]. При этом эффективность маркшейдерской службы заключается в точном и своевременном определении геометрических параметров карьера. Некачественные маркшейдерские работы могут привести не только к неэффективности предприятия, но и к чрезвычайным ситуациям, которые могут повлечь за собой гибель людей [3].

Основной объем сырой руды на предприятиях России добывается открытым способом. Для крупных предприятий характерны высокая производительность забоев и быстрая изменчивость границ отвального комплекса, хвостового хозяйства, а также одновременная работа нескольких строительных площадок [4]. В то же время для небольших открытых выработок в июле 2017 г. упростился процесс отведения карьеров для дорожного строительства, что позволяет подрядчикам, занимающимся строительством и реконструкцией дорог, добывать гравий, песок, щебень и др. на участках местного значения. При этом упрощение порядка предоставления карьеров для исполнителей госконтрактов не снимает с них ответственности при добыче.

Оперативный контроль выработок традиционными средствами затруднен, так как наземные методы съемки требуют су-

ществленного времени на камеральные и полевые работы, а зачастую их невозможно выполнить по погодным или производственным причинам. Картографические данные подвергаются большому влиянию человеческого фактора. Данные условия приводят к неточностям в отображении ситуации, снижают точность и значимость маркшейдерских работ. Для повышения производительности и точности с недавнего времени стало возможным применение аэрофотосъемки (АФС) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [5].

Современные беспилотные комплексы бывают самолетного и мультироторного типов и, как правило, оснащены фотоаппаратурой / лазерным сканером, системой навигации, управления и связи. При этом оперативность получения результата гораздо выше в сравнении со спутниковой или тахеометрической съемкой. Создаваемые БЛА-комплексами цифровые модели поверхности (ЦМП), а после камеральной обработки и цифровые модели рельефа (ЦМР) детальнее наземных съемок и обеспечивают точное и полное измерение объемов. Кроме того, они позволяют вести мониторинг состояния отвалов карьера и хода выполнения горных работ. Создаваемые в автоматическом режиме ЦМР по данным АФС/ВЛС или их комбинации служат основой для подготовки отчетной документации, необходимой для предприятия и предоставления в надзорные органы, при этом ВЛС позволяет получать границы рельефа даже под растительностью [6]. При создании типовых планов и разрезов используются ортофотопланы и ЦМР, которые векторизуются в специализированных геоинформационных системах (ГИС). Примечательно, что ГИС позволяет по данным беспилотной воздушной съемки не только дешифровать элементы карьера (бровки уступов, съезды, строения, насыпи), строить разрезы, создавать топографические планы, но и проводить оценку воздействия на окружающую среду, управлять имуществом в целом [7]. Универсальность данных позволяет принимать

на их основе как технологические, так и управленческие решения с момента проектирования и до рекультивации почв. Появляется возможность комплексного обследования открытых горных выработок даже на самых сложных участках. При этом

оперативность получения данных и их качество растут, а стоимость современных методов обеспечения маркшейдерских работ ниже стоимости традиционных наземных.

Методический эксперимент по изучению опасных геодинамических процессов с применением современных информационных технологий

Для подтверждения приведенных выше аргументов о применимости БЛА и информационных технологий для прогнозирования развития опасных геологических процессов открытых горных выработок в 2016 г. был проведен методический эксперимент с участием представителей горнодобывающей компании и исследовательского коллектива во главе с автором.

После приведения фактов стремительного развития технологий, основанных

на построении трехмерных моделей местности и рельефа по данным беспилотной аэрофотосъемки, руководством предприятия было одобрено исследование применимости современных технологий.

Для этих целей был выбран крупнейший горно-обогатительный комбинат Михайловский [8], который находится в районе г. Железногорска Курской области (рис. 1).



Рис. 1. Михайловский ГОК

В рамках работ по мониторингу карьерного хозяйства Михайловского горно-обогатительного комбината (ГОК) было решено провести исследование внешнего многоярусного отвала вскрышных горных пород, после чего задействовать аэрофотосъемку с БЛА самолётного типа с последующей фотограмметрической обработкой снимков для сравнения полученных результатов с имеющимися данными полевой геодезической съемки.

Традиционно для изучения опасных геодинамических процессов на данном отвале были организованы инструментальные геодезические наблюдения по шести реперным линиям, заложенным на участке развития оползневых деформаций. Измерения проводились регулярно с периодич-

ностью раз в полгода. Интерпретация результатов наземных наблюдений показала, что деформации откосов отвала обусловлены одновременно двумя геодинамическими процессами: осадками, вызванными гравитационным уплотнением насыпной породы, и оползневыми смещениями, проявляющимися с различной интенсивностью в зависимости от высоты отвала. При этом за последние пять лет, по данным наземных наблюдений, смещения породы были незначительными, скорость вертикальной осадки составила 15 см/год.

Аэрофотосъемка карьера железорудного месторождения была проведена двухкилевым БЛА по схеме «летающее крыло» с тянущим электродвигателем. Данные аппараты способны выполнять работу до 4-5

часов, при этом достаточно устойчивы к ветровым нагрузкам и сильному магнитному полю железорудного карьера. Для повышения точности измерений на борту был установлен двухсистемный геодезический ГНСС-приемник, а реперы, по которым проводят наземные измерения, использовались в качестве планово-высотных опознавательных знаков. Выполнение работ по созданию ЦМР для последующего прогнозирования развития опасных геологических процессов горных выработок на ГОК было разделено на следующие этапы:

- подготовительные работы по развитию опорной сети;
- аэрофотосъемочные работы на основе БЛА;

- камеральные работы по уравниванию координат, созданию ортофотопланов и ЦМР;

- аналитическая обработка пространственных данных в ГИС;

- сравнение данных, полученных традиционными и современными методами.

За один полёт было снято около 10 кв. км площади отвала, получено 1400 аэрофотоснимков с точной привязкой координат. Фотограмметрическая обработка производилась в программном продукте Pix4D [9] с последующей доработкой в Photomod UAS [10]. По результатам этой обработки была получена ЦМР с максимальным уклоном по высоте 20 см и плановой точностью 30 см (рис. 2).

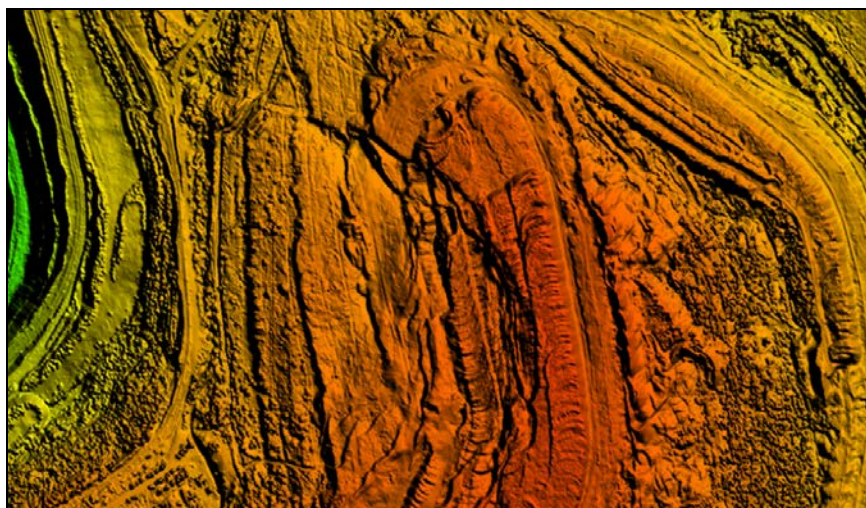


Рис. 2. ЦМР по данным беспилотной аэрофотосъемки

На эту модель были наложены данные последних геодезических наблюдений по реперным линиям, а также топографическая карта отвала пятилетней давности, полученная посредством наземной съёмки. Комплексный анализ всего тела отвала позволил провести комплексный анализ состояния отвалов и сделать несколько существенных выводов.

Так, если измерение координат реперов, расположенных ближе к центральной части отвала, вдали от бровок уступов, расхождений с данными последней полевой съёмки не выявило, то совсем иная ситуация возникла с реперами, находящимися вблизи краёв отвальной массы. Здесь смещение плановых координат составило

до полуметра, а по высоте – до 1 метра и более. Благодаря появившейся возможности осмотра состояния карьера и отображения картины полностью, одновременно и комплексно, были идентифицированы края тела смещения породы, его вектор и характер деформации, что позволило выявить существенное оползневое смещение. Особую опасность в данном случае оползневые процессы представляют для железнодорожной колеи, расположенной у подножия отвала - с одной стороны и пойменной части реки - с другой. Также в ходе анализа ЦМР были обнаружены трещины в грунте в местах, где нет постоянных реперов и регулярные исследования не проводились. Данные зоны были отмечены

как нестабильные, с вероятным смещением грунта в ближайшем будущем. Показательно было сравнение профилей рельефа вдоль реперных линий, измеренных наземными методами, с полученными по результатам аэрофотосъемки. Наземная съемка имеет выборочный характер, вследствие чего при построении профиля

точки с измеренными координатами соединяются прямой (путём интерполяции). В результате малые формы рельефа часто выпадают из внимания. ЦМР, выполненная по материалам аэрофотосъемки, позволяет получить профиль, максимально приближенный к реальности (рис. 3).

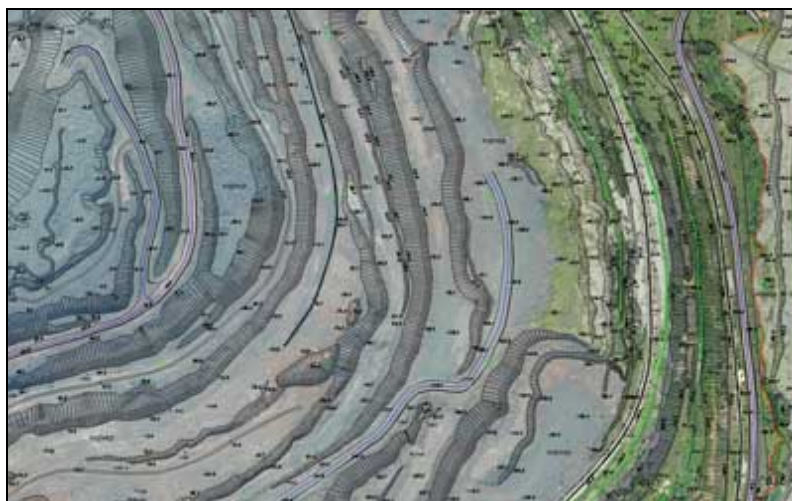


Рис. 3. Пункты геодезической съемки, сопоставленные с ЦМР по данным аэрофотосъемки

На данных профилях было выявлено выполаживание бровок откосов и скопление осадочного материала у подножия склонов, что связано с естественными экзогенными процессами, действующими в том числе и на искусственные формы рельефа, такие как отвалы горных пород.

Таким образом, продемонстрированная технология мониторинга с БЛА доказала свою эффективность. Среди преимуществ можно отметить, что плотность точек поверхности и, соответственно, полу-

чаемой модели рельефа гораздо выше, чем при наземной геодезической съемке. Это даёт гораздо больше информации об исследуемой поверхности. Кроме того, немаловажным фактором является соответствие точности координат допустимым значениям по всей площади съемки (а не только в пределах опознавательных знаков), что позволяет принять полученные ЦМР и ортофотопланы в качестве основы для создания крупномасштабных топографических планов.

Заключение

Рассмотренная технология имеет большие перспективы на внедрение в добывающей промышленности. В дальнейшем планируется испытать технологию лазерного сканирования с беспилотного летательного аппарата вертолётного типа. Данный вид съемки должен быть более точным и информативным, в том числе за

счет возможности съемки сквозь растительность. Испытанные новые технологии позволят внедрить съемку с БЛА в качестве постоянного инструмента на многих предприятиях горнодобывающей отрасли для обеспечения устойчивости процессов добычи и рационального использования природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasuki, Y. Semi-automatic mapping of geological structures using uav-based photogrammetric data: an image analysis approach / Y. Vasuki, E.J. Holden, P. Kovesi, S. Micklethwaite // *Computers & Geosciences*. - 2014. - № 69 (4). - P. 22-32.
2. Shafiee, S. New approach for estimating total mining costs in surface coal mines / S. Shafiee, E. Topal // *Mining Technology*. - 2012. - № 121. - P. 109-116.
3. Mancini, L. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks / Lucia Mancini, Serenella Sala // *Resources Policy*. - 2018. - Vol. 57. - P. 98-111.
4. Glazyrina, I. Econ International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences / I. Glazyrina, S. Lavlinskii // *Regional Research of Russia*. - 2017. - Vol. 7. - Is. 2. - P. 180-187.
5. Nakano, K. On a fundamental evaluation of a UAV equipped with a multichannel laser scanner / K. Nakano, H. Suzuki, K. Omori, K. Hayakawa.
6. Рыльский, И.А. Сравнение пригодности данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки с БПЛА для обеспечения проектных работ / И.А. Рыльский, И.В. Калинин // *Геопрофи*. - 2017. - № 2. - С. 15-22.
7. Spano, A. GIS-based detection of terraced landscape heritage: comparative tests using regional DEMs and UAV data / Antonia Spano [et all] // *Applied Geomatics*. - 2018. - № 10. - P. 77-97.
8. Михайловский ГОК. - URL: <http://www.metalloinvest.com/business/mining-segment/mgok/> (дата обращения: 01.02.2018).
9. Becker, C. Classification of aerial photogrammetric 3d point clouds / C. Becker [et all] // *Technical Commission II: Photogrammetry - ISPRS*.
10. Тайлаков, О.В. Алгоритмическое и программное обеспечение с применением беспилотных летательных аппаратов для оценки остатков угля на открытых складах / О.В. Тайлаков, Д.С. Корвин, М.П. Макеев, С.В. Соколов // *Уголь*. - 2015. - С. 68-71.
1. Vasuki, Y. Semi-automatic mapping of geological structures using uav-based photogrammetric data: an image analysis approach / Y. Vasuki, E.J. Holden, P. Kovesi, S. Micklethwaite // *Computers & Geosciences*. - 2014. - № 69 (4). - P. 22-32.
2. Shafiee, S. New approach for estimating total mining costs in surface coal mines / S. Shafiee, E. Topal // *Mining Technology*. - 2012. - № 121. - P. 109-116.
3. Mancini, L. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks / Lucia Mancini, Serenella Sala // *Resources Policy*. - 2018. - Vol. 57. - P. 98-111.
4. Glazyrina, I. Econ International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences / I. Glazyrina, S. Lavlinskii // [Regional Research of Russia](#). - 2017. - Vol. 7. - [Is. 2](#). - P. 180-187.
5. Nakano, K. On a fundamental evaluation of a UAV equipped with a multichannel laser scanner / K. Nakano, H. Suzuki, K. Omori, K. Hayakawa.
6. Rylsky, I.A. Data reliability comparison of air laser scanning and air photography using drones to support design works / I.A. Rylsky, I.A. Kalinkin // *Geophy*. - 2017. - No.2. - pp. 15-22.
7. Spano, A. GIS-based detection of terraced landscape heritage: comparative tests using regional DEMs and UAV data / Antonia Spano [et al.] // *Applied Geomatics*. - 2018. - № 10. - P. 77-97.
8. *Mikhailovsky MPC*. - URL: <http://www.metalloinvest.com/business/mining-segment/mgok/> (address date: 01.02.2018.)
9. Becker, C. Classification of aerial photogrammetric 3d point clouds / C. Becker [et all] // *Technical Commission II: Photogrammetry - ISPRS*.
10. Tailakov, O.V. Algorithmic software using drones to assess coal remains in open warehouses / O.V. Tailakov, D.S. Korovin, M.P. Makeev, S.V. Sokolov // *Coal*. - 2015. - pp. 68-71.

Статья поступила в редакцию 6.07.18.

Рецензент: д.т.н., профессор АО «ГЕОМИП»

Воронков В.Н.

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Флоров Алексей Вадимович, к.т.н., мл. науч. сотрудник Института конструкторско-технологической информатики РАН, тел.: +7(926) 135-87-82, e-mail: florovaleksey@mail.ru.

Florov Alexey Vadimovich, Can. Sc. Tech., Junior research assistant, Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: florovaleksey@mail.ru.