

УДК 622.831

**СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, О. В. Наговицын

*Горный институт КНЦ РАН,
E-mail: k.konstantinov@ksc.ru, ул. Ферсмана, 184209, г. Апатиты, Россия*

Представлена структура комплексной системы мониторинга, учитывающая горно-геологические и горнотехнические условия разработки месторождения, особенности основных объектов производства и инфраструктуры, технические характеристики и методики применяемых измерительных средств. Выполнена группировка и составлен перечень потенциально опасных объектов, необходимых для включения в систему мониторинга. Для каждой группы объектов определены объединяющие их особенности, свойства, критерии и другие характеристики, на основе которых осуществляется методическое сопровождение мониторинга с целью обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации. Реализован макетный вариант системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия на базе горно-геологической информационной системы MINEFRAME, сформирована база данных объектов мониторинга.

Мониторинг, перечень объектов, устойчивость бортов карьера, геоинформационная система, база данных, источники тематических данных

DOI: 10.15372/FTPRPI20210407

Интенсификация открытых горных работ и связанное с этой тенденцией расширение и углубление границ карьерной выемки делают необходимым решение вопросов по обеспечению безопасности производства и сохранению устойчивости как бортов карьеров и отвалов, так и основных промышленных объектов, находящихся в пределах промплощадки и горного отвода предприятия [1]. Основная цель организации системы мониторинга устойчивости объектов горно-обогатительного комбината и прилегающей к нему территории — обеспечение безопасного непрерывного производственного цикла предприятия. Для этого на первоначальном этапе важно обоснованное составление перечня объектов, подлежащих включению в общую интегрированную схему мониторинга.

Работа подготовлена при поддержке международного проекта NazArctic.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Структуру комплексной системы мониторинга устойчивости открытых горных работ представим на примере АО “Ковдорский ГОК” — ведущего горнодобывающего предприятия в составе Управляющей компании АО “МХК “Еврохим”. Главный сырьевой ресурс предприятия — месторождение магнетитовых и апатитовых руд, обрабатываемое открытым способом рудником “Железный” с 1960-х годов XX в. Перспективная концепция развития Ковдорского ГОКа основана на продлении сроков открытых горных работ за счет углубления карьера и увеличения их площади [2].

В результате интенсивного ведения горных работ открытым способом и сопутствующей хозяйственной деятельности в пределах горного и земельного отводов образовалась крупная карьерная выемка глубиной более 500 м, отвальное и хвостовое хозяйства были вовлечены в обработку дополнительного месторождения полезного ископаемого. Со временем встал вопрос организации системы мониторинга геомеханического состояния данных объектов. Отдельные элементы такой системы мониторинга действовали на комбинате и ранее, практически с начала его деятельности. Задача современного этапа — разработка комплексной системы мониторинга на базе применения цифровых технологий.

Пример составления перечня объектов мониторинга в рамках начального этапа решения поставленной задачи. Данный этап сформирован из четырех групп объектов комбината:

- I — поверхности бортов карьеров и отвалов;
- II — гидротехнические сооружения;
- III — здания и сооружения;
- IV — объекты на прилегающей территории.

Каждая группа обладает своими особенностями, свойствами, критериями и другими характеристиками, на основе которых происходит их формирование и методическое сопровождение с целью обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации объектов мониторинга в отдельности с последующим внедрением в общую интегрированную схему.

Принимая во внимание ключевую и логичную взаимосвязь объектов I группы с остальными объектами мониторинга устойчивости, в настоящей работе предложена структура комплексной системы мониторинга применительно к элементам открытой геотехнологии (таблица). Подобный перечень имеется и для объектов II, III и IV групп.

Группа I. Поверхности бортов карьеров и отвалов

Объект	Элемент объекта	Местонахождение
Карьер “Железный”	Уступ	Горный отвод
	Группа уступов	
	Борт	
Карьер апатит-штаффелитовых руд	Уступ	Горный отвод
	Группа уступов	
	Борт	
Техногенное месторождение	Уступ Борт	Горный отвод
Породный отвал 1	Ярус Породный отвал 1	Земельный отвод
Породный отвал 2	Ярус Породный отвал 2	Земельный отвод
Породный отвал 3	Ярус Породный отвал 3	Земельный отвод Земельный отвод

ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Функционально система является одной из подсистем корпоративной геоинформационной системы (ГИС) [3], что и определяет схему ее организации (рис. 1).

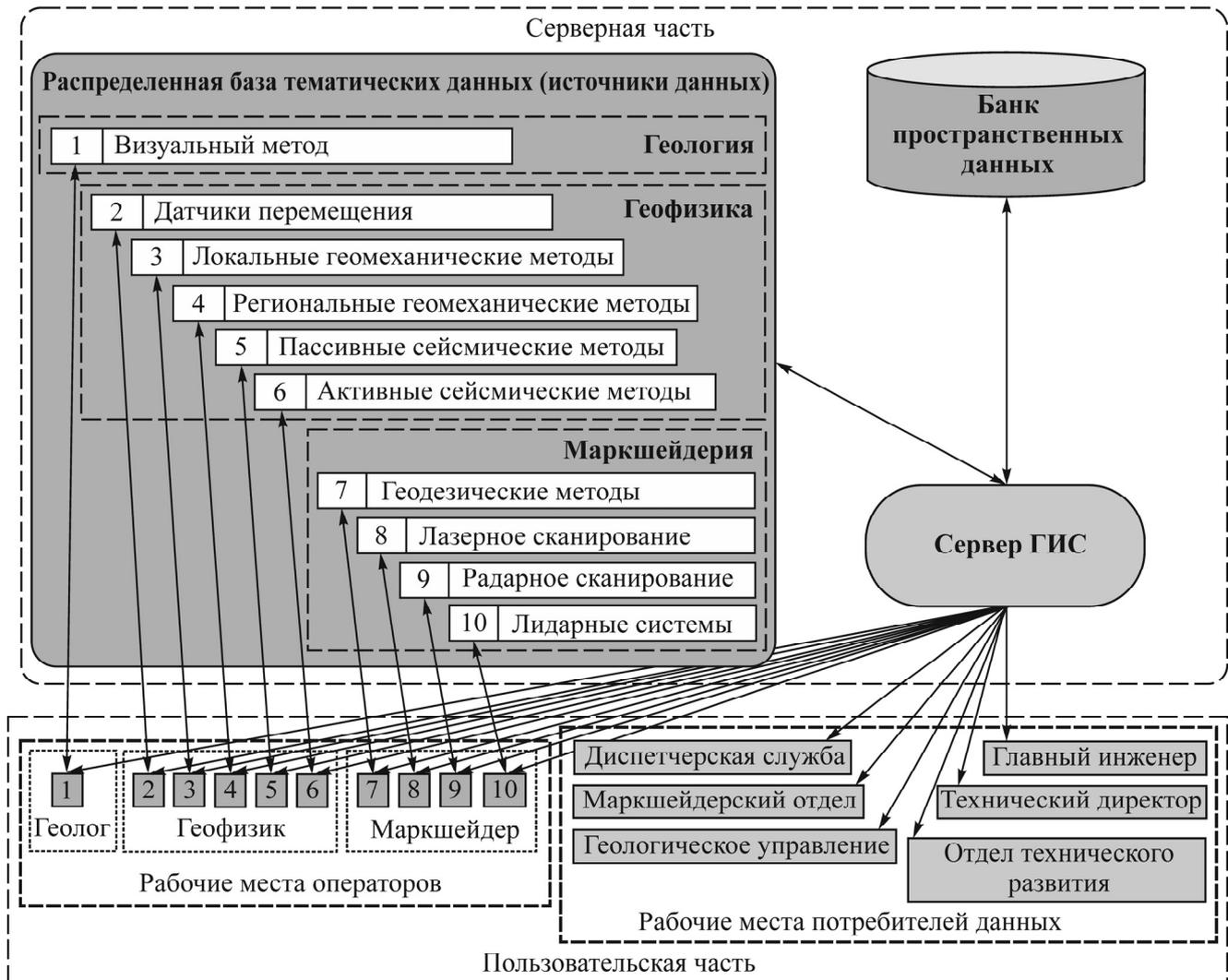


Рис. 1. Структурная схема организации системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия

Основу составляет платформа ГИС, поддерживающая трехмерные данные и работу с рельефом. Необходимое условие работы с пространственными данными в многопользовательской среде — разделение на серверную и пользовательскую части [4]. Это полнофункциональная профессиональная ГИС, состоящая из:

- сервера ГИС, обеспечивающего доступ клиентов к пространственным данным;
- средств подготовки пространственных данных;
- средств разработки приложений;
- сервера приложений;
- средств построения web-портала для удаленной работы.

С точки зрения возможностей расширения функционала и адаптации к условиям горнодобывающего предприятия наилучшим выбором представляется платформа горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME [5 – 8], разработанная специалистами Горного института Кольского научного центра. Тесный контакт с разработчиками обеспечит оперативное внедрение необходимых расширений и внесение необходимых изменений в ядро платформы для наиболее точного и наглядного отображения информации. Кроме того, разработчикам хорошо знакомы горно-геологические условия Кольского полуострова и климатические особенности Крайнего Севера.

Программные средства ГГИС обеспечивают коллективный, контролируемый доступ к базам данных объектов горной технологии, позволяя формировать единое информационное пространство предприятия. Хранение информации, поступающей в ГГИС от источников данных единой наблюдательной сети мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия, предусматривает наличие средств доступа к базам данных (БД) геологических, геофизических и маркшейдерских наблюдений. К указанным объектам можно прикрепить произвольный набор первичных документов (журналы наблюдений, акты и протоколы, фиксирующие опасные события) и документированные результаты их обработки (интерпретация съемок и профилирование, выделение потенциально опасных зон, отчеты об исследованиях и пр.). Периодичность наблюдений, поступление новых данных об их состоянии и сопряженное с этим обновление соответствующих моделей ГГИС в реальном времени позволяют создавать цифровые двойники объектов мониторинга, являющиеся составной частью цифрового горного предприятия.

Подсистема мониторинга потенциально опасных объектов как часть системы планирования и инженерного обеспечения ведения горных работ, входящей в ГГИС, содержит:

- 1) средства мониторинга вовлеченного в отработку массива горных пород, подземных горных выработок и целиков, уступов и бортов карьера, усреднительных и накопительных рудных складов, отвалов вскрышных пород, хвостохранилищ, зданий и сооружений;
- 2) БД объектов мониторинга, сохраняющие информацию об их состоянии на всех этапах жизненного цикла горного предприятия;
- 3) средства моделирования и визуализации объектов мониторинга с использованием ассоциированной с ними информации;
- 4) средства анализа данных о состоянии объектов мониторинга для формирования управляющих воздействий как реакции на критические события на таких объектах.
- 5) связь с инструментами проектирования и планирования горных работ для обеспечения их актуализированной информацией о состоянии объектов мониторинга.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ БД ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для реализации макетного варианта системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия на базе ГГИС MINEFRAME сформирована БД “KOVADOR”. Для ее создания потребовалось выполнить обновление структуры БД с объектами Ковдорского ГОКа, после чего проанализировать и оценить актуальность имеющихся в них объектов. В проект загружены космические снимки объектов и после сопоставления они наложены на объекты для придания им реалистичного вида (рис. 2). В результате создана БД “KOVADOR”, содержащая в себе четыре группы объектов: горный отвод, земельный отвод, хвостовое хозяйство, наблюдательные станции.

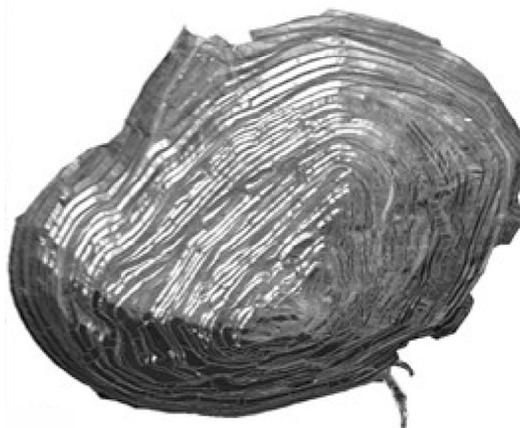


Рис. 2. Карьер “Железный” с текстурами

Группа “Горный отвод” содержит в себе три объекта и две группы объектов:

1. АШР (карьер по добыче апатит-штаффелитовых руд);
2. Карьер “Железный”;
3. Техногенное месторождение;
4. Группа объектов “Уступы”;
 - 4.1. Уступ + 94;
 - 4.2. Уступ + 55;
5. Группа объектов “Группы уступов”;
 - 5.1. Юг, юго-запад;
 - 5.2. Север, северо-восток;
 - 5.3. Восток, юго-восток;
 - 5.4. Северо-запад.

В группе “Горный отвод” объект “Техногенное месторождение” представляет собой двухмерный объект, остальные объекты, содержащиеся в данной группе, являются трехмерными.

В качестве примера источника тематических данных (см. рис. 1) для включения в Систему предложена БД изученности напряженно-деформированного состояния, сформированная по результатам многолетних натурных измерений на наблюдательных станциях методом разгрузки [9] и обновляемая по мере развития карьера и формирования заоткоски. Данные исследования выполняются при участии финских специалистов в рамках проекта NazArctic, одной из основных задач которого является исследование в области устойчивости бортов карьеров.

На объекте “Карьер “Железный” выделены четыре группы уступов (юг, юго-запад; север, северо-восток; восток, юго-восток; северо-запад), после чего каждая группа оконтурена и помещена в отдельный объект. Далее для каждого объекта созданы и наложены текстуры, которые отображают напряженно-деформированное состояние на выделенных участках карьера (рис. 3а).

Помимо групп уступов в карьере “Железный” оконтурены и вынесены в отдельные объекты два уступа “Уступ + 94” и “Уступ + 55”. Группа “Земельный отвод” включает три объекта (отвал 1, отвал 2, отвал 3). Отвалы представлены в виде трехмерных моделей. Группа “Наблюдательные станции” содержит восемь подгрупп, каждая подгруппа соответствует расчетному участку в таблице разгрузки и имеет наблюдательные станции, относящиеся к соответствующему расчетному участку. Наблюдательные станции представлены в виде трехмерных конусов, привязанных к поверхности карьера (рис. 3б).

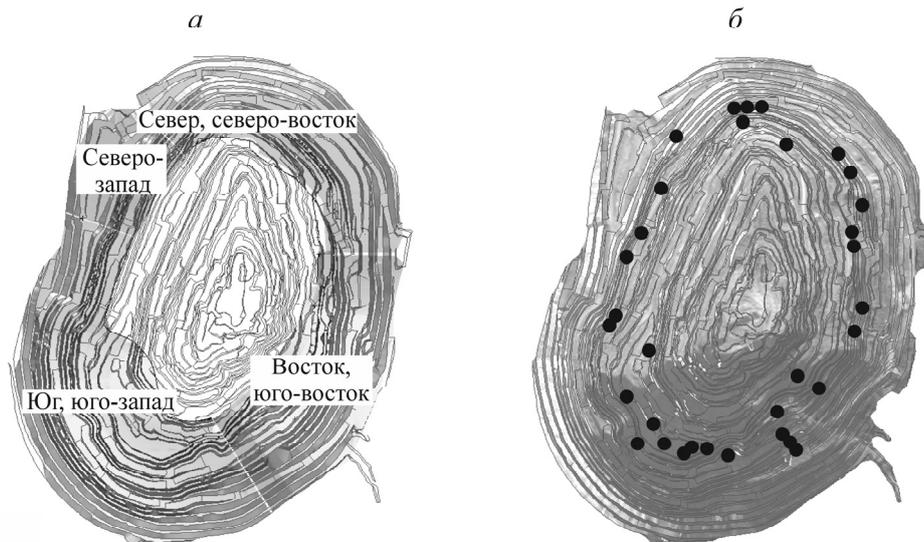


Рис. 3. Группы уступов карьера “Железный” (а) и наблюдательные станции (б)

Для быстрого отображения информации о методах мониторинга уступов, групп уступов и борта карьера к объектам базы данных прикреплены документы с описанием методов мониторинга соответствующих объектов. К объекту “Карьер “Железный” прикреплены девять файлов (источники тематических данных на рис. 1):

- 1) БД измерений методом разгрузки;
- 2) мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов);
- 3) мониторинг с использованием датчиков перемещения);
- 4) данные микросейсмического мониторинга;
- 5) данные радарного сканирования;
- 6) данные измерений методами классической геодезии;
- 7) спутниковые оптические снимки;
- 8) спутниковые радарные снимки;
- 9) численные методы мониторинга.

К объектам “Юг, юго-запад”, “Север, северо-восток”, “Восток, юго-восток”, “Северо-запад” прикреплены семь файлов, шесть из которых описывают методы мониторинга групп уступов карьера “Железный”, а именно: GPS-геодезия; датчики перемещения (описание мониторинга с использованием датчиков перемещения); межскважинная сейсмическая томография; наземное лазерное сканирование; сейсмический мониторинг массовых взрывов; численные методы мониторинга.

Помимо файлов с описанием методов, прикреплен файл с таблицей разгрузки, содержащий данные по расчетным участкам, попавшим в выделенную область. Объект “Север, северо-восток” содержит данные по I, II и III расчетным участкам, объект “Восток, юго-восток” — по III, IV и V расчетным участкам, объект “Юг, юго-запад” — по V, VI, VII и VIII расчетным участкам, объект “Северо-запад” — по VIII и I расчетным участкам. К объектам “Уступ + 55” и “Уступ + 94” прикреплены шесть файлов, описывающих методы мониторинга уступов на карьере “Железный”: визуальный метод; метод разгрузки; межскважинная сейсмическая томография; нивелирование; телевизионный контроль скважин; ультразвуковой метод. Любой при-

крепленный файл можно открыть, воспользовавшись списком документов данного объекта в среде ГГИС MINEFRAME. Списки документов объектов в дальнейшем могут пополняться любыми файлами.

БД “KOVDOR” демонстрирует расположение в пространстве объектов Ковдорского ГОКа, местонахождение наблюдательных станций на трехмерной модели карьера, области напряженно-деформированного состояния массива пород в борту карьера. В дальнейшем она может пополняться объектами, отображающими параметры регистрации данных микросейсмического мониторинга, геодезии и другими объектами.

ВЫВОДЫ

Обоснована структура системы мониторинга, учитывающая состав вовлеченных в процесс мониторинга подразделений и служб АО “Ковдорский ГОК”, технические характеристики и методики применяемых измерительных средств и комплексов, горно-геологические условия разрабатываемого месторождения, особенности основных производственных объектов и объектов инфраструктуры.

В целях обеспечения безопасного непрерывного производственного цикла горнодобывающего предприятия предложен перечень групп потенциально опасных объектов, подлежащих включению в интегрированную систему мониторинга. Для каждой группы выделены объединяющие их особенности, свойства, критерии и другие характеристики, на основе которых проводится методическое сопровождение мониторинга по организации безопасной и бесперебойной эксплуатации таких объектов.

Реализован макетный вариант системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия на базе ГГИС MINEFRAME, сформирована база данных объектов мониторинга “KOVDOR”. Выбранный подход показывает преимущества цифрового решения комплексной интеграции экспериментальных данных наблюдений за потенциально опасными объектами в едином информационном пространстве, объединяющем наиболее важные объекты геологической среды, горной технологии, производственной инфраструктуры. Это создает предпосылки для создания цифровых двойников объектов мониторинга как составной части цифрового горного предприятия.

Содержание данной статьи является исключительной собственностью ее авторов и может не отражать взглядов Европейского Союза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуйич С., Максимович С., Радосавльевич М., Крунич Д. Я. Межотраслевое моделирование и горнодобывающая промышленность // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 78–87.
2. Данилкин А. А., Козырев А. А., Бочаров С. Н., Рыбин В. В. Перспективная концепция развития горных работ на АО “Ковдорский ГОК” // Горн. журн. — 2019. — № 6. — С. 30–34.
3. Дышленко С. Г. Построение корпоративных ГИС на основе банка пространственных данных // Геопрофи. — 2010. — № 1. — С. 13–15.
4. Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 53–57.

5. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Моделирование объектов и процессов горной технологии как основа системного подхода к решению задач горного производства // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 180–189.
6. **Научные и практические аспекты** применения цифровых технологий в горной промышленности / под ред. С. В. Лукичева. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 192 с.
7. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // Горн. журн. — 2019. — № 6. — С. 51–55.
8. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности / прошлое, настоящее, будущее // Горн. журн. — 2020. — № 9. — С. 13–18.
9. **Rybin V. V., Panin V. I., Kagan M. M., and Konstantinov K. N.** Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits, Geomech. Geodynam. Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mech. Symp., 2018, Vol. 1. — P. 551–556.

Поступила в редакцию 21/VI 2021

После доработки 26/VI 2021

Принята к публикации 30/VI 2021