

УДК 622.838:626/627(470.21)

ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ: КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО МОНИТОРИНГА ИХ ГЕОГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

А.И. Калашник

ведущий научный сотрудник лаборатории Геофлюидомеханики, канд. техн. наук, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Аннотация. Изложены концептуальные подходы к формированию многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов, в основу которого положен принцип комплексирования междисциплинарных исследований, включающих в себя наземные и GPS геодезические, геофизические и гидрологические измерения, а также подповерхностные, наземные, воздушные и спутниковые георадарные съемки. Подходы базируются на проведении режимных наблюдений на различных уровнях: дистанционном, воздушном, наземном, подповерхностном, а также компьютерном моделировании, и синхронной обработке результатов с использованием информационных технологий «BIG DATA» и «CLOUD SERVICE». Натурные многоуровневые исследования составляют основу мониторинга, в результате которого полученные данные о геогидромеханическом состоянии горнотехнических объектов в автоматизированном режиме дополняют базы данных системы поддержки принятия решений. Многоуровневый подход используется и в компьютерном моделировании: создаются 2D и 3D модели горнотехнических объектов как иерархически вложенных структур, с мультимасштабным их исследованием. Концепция многоуровневого комплексного мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов апробирована на основных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова.

Ключевые слова: горнотехнические объекты, мониторинг, многоуровневые исследования, комплексирование, промышленная и экологическая безопасность.

MINING OBJECTS: CONCEPT OF MULTILEVEL MONITORING OF THEIR GEOHYDROMECHANICAL STATE

Anatoly Kalashnik

Leading Researcher of Geoflyuidomechanikal Laboratory, Dr (Eng.), Mining institute KSC RAS, Apatity, Russia, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Abstract. Conceptual approaches to forming of multilevel monitoring of a geohydromechanical status of mining objects which basis the principle of integration of the cross-disciplinary researches including land and GPS geodetic, geophysical and hydrological measurements and also subsurface, land, air and satellite georadar shooting is are stated. Approaches are based on carrying out regime observations at the different levels: remote, air, land, subsurface and also computer simulation, and synchronous processing of results with use of information technologies «BIG DATA» and «CLOUD SERVICE». Natural multilevel researches make a basis of monitoring as a result of which data retrieved about a geohydromechanical status of mining objects in the automated mode supplement databases of decision making support system.

Multilevel approach is used also in computer simulation: 2D and 3D models of mining objects as hierarchically enclosed structures are created, with their multilarge-scale research. The concept of multilevel complex monitoring of a geohydromechanical status of mining objects is approved at the main mining enterprises of the Kola Peninsula.

Keywords: mining objects, monitoring, multilevel researches, integration, industrial and environmental safety.

Введение. В Российской Федерации имеет значительное развитие горная промышленность. Горнопромышленными предприятиями создаются различного рода и назначения горнотехнические объекты, которые обеспечивают их деятельность и устойчивое развитие. В частности, на Кольском полуострове, основными горнодобывающими и перерабатывающими комплексами АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», АО «Апатит», ОЛКОН, Ловозерский ГОК, созданы более 300 горнотехнических объектов, которые наряду с их большой промышленно-экономической значимостью оказывают существенное влияние на окружающую природную среду [1]. Вследствие горнодобывающей деятельности на полуострове происходят опасные геодинамические процессы и природно-техногенные землетрясения магнитудой свыше 4, приводящие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций; активизируются современные тектонические движения земной коры, которые, в свою очередь, осложняют ведение работ и снижают промышленную и экологическую безопасность [2, 3].

Для промышленной и экологической безопасности горнотехнических объектов промышленных предприятий необходимо перспективное и стратегическое решение задач обеспечения их механической устойчивости и функциональности при природных и техногенных воздействиях [1, 3, 4]. Необходимым и обязательным условием этого является комплексный многоуровневый мониторинг геогидромеханического состояния горнотехнических объектов и сопряженной с ними геологической среды, организованный на различных масштабных и измерительных уровнях, проведение которого позволяет выявить на ранней стадии развитие опасных фильтрационно-деформационных процессов [3, 5, 6]. Это позволит выявить потенциально опасные геомеханические процессы и прогнозировать геодинамические проявления (землетрясения, активизация тектонических движений и блоковых смещений геологической среды, трансформация дневной поверхности, горно-тектонические удары, сдвиги, проседания, изменение гидрогеологического режима, береговой линии водоемов и т.п.) на ранних стадиях их формирования и своевременно принять решения по защите как са-

мих объектов, так и окружающей природно-технической среды. Эти опасные процессы также могут быть “спусковым механизмом” для разрушений горнотехнических объектов добывающих комплексов, приводящим к значимым социально-экономическим потерям: разрушению горнодобывающей инфраструктуры, близлежащих населенных пунктов и промышленных объектов, человеческим жертвам, остановке горнодобывающего и перерабатывающих предприятий, токсичному загрязнению отходами земель, рек и озер, и, как следствие, экономическому ущербу, измеряющемуся сотнями миллионов рублей.

Важную роль при этом играют экспертная оценка механического состояния и функциональности горнотехнического объекта, а также результаты прогнозирования на основе создания компьютерных моделей и моделирования различных вариантов развития ситуации. В комплексе с использованием баз данных и знаний становится возможным своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

Цель исследования. Основная цель обеспечения промышленной и экологической безопасности горнотехнических объектов горнодобывающих комплексов заключается в перспективном и стратегическом решении задач обеспечения их геогидромеханической устойчивости и функциональности при природных и техногенных воздействиях (рис. 1). [3, 6, 7]. Природное воздействие на горнотехнический объект подразумевает действие гравитационных и тектонических сил, эффекты от современных движений земной коры, процессов по активным геологическим разломам, природных землетрясений, подземных, поверхностных и паводковых вод, и др. Техногенное воздействие обусловлено горнодобывающими процессами, взрывной отбойкой пород, крупномасштабным перемещением породных масс, заполнением накопителей жидких горнопромышленных отходов, сбросов промышленных вод и др. Совместное интегрированное воздействие приводит к изменению механической устойчивости и функциональности горнотехнического объекта, а также сопряженной с ним геологической среды.

Обязательным условием обеспечения безопасности горнотехнического объекта является комплексный многоуровневый геогидромеханический мониторинг, проведение которого позволит выявить на ранней стадии развитие опасных деформационных процессов. Важную роль при этом играют экспертная оценка геогидромеханического состояния и функциональности сооружения, а также возможность прогнозирования на основе создания компьютерных моделей и моделирования различных вариантов разви-

тия ситуации [3]. В комплексе с использованием баз данных и знаний становится возможным своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

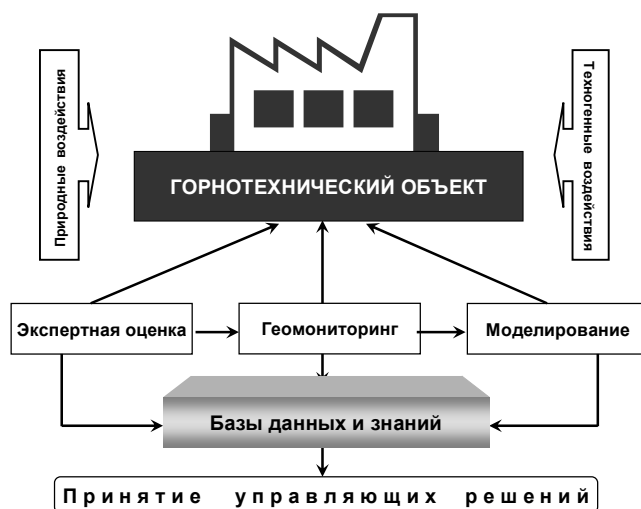


Рисунок 1 - Концептуальная структура обеспечения промышленной и экологической безопасности горнотехнического объекта

Для этих целей в Горном институте КНЦ РАН (г. Апатиты) создается комплексная многоуровневая система геомониторинга горнотехнических объектов горнодобывающих комплексов, базирующаяся на комплексировании междисциплинарных натуральных наблюдений и компьютерном геогидромеханическом моделировании [2, 3]. В различных модификациях система мониторинга апробирована на крупных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова: АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «Апатит», ГОК «Олений ручей», ГОК «ОЛКОН», а также на накопителях жидких промышленных отходов перерабатывающих и металлургических предприятий [2, 3, 6, 7].

Методические подходы. В системной структуре комплексного многоуровневого геогидромеханического мониторинга горнотехнических объектов горнодобывающих комплексов предлагается использовать, наряду с уже ставшими традиционными (геомеханические измерения, геодезические наблюдения, сейсмические, лазерные методы, аэрофотосъемка), новые методы измерений и исследований, такие как: георадарное подповерхностное зондирование, радарное площадное сканирование, спутниковые многоспектральные и радарные снимки, GPS-технологии [3, 8, 9-11], а также компьютерное геомеханическое и геогидромеханическое моделирование [3] (рис. 2).

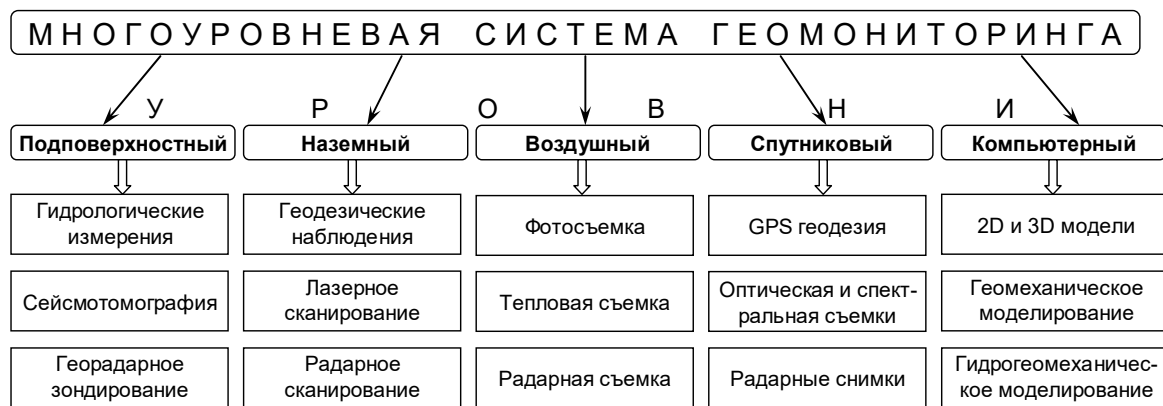


Рисунок 2 - Системная структура многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов

Выполнение мониторинга предусматривается на пяти уровнях, первые четыре из которых (подповерхностный, наземный, воздушный, спутниковый) соотносятся с дневной поверхностью, а пятый уровень (компьютерный) основан на построении 2D- и 3D-моделей, геомеханическом и геогидродинамическом исследовании (моделировании).

Подповерхностный уровень. Деформационно-фильтрационные процессы, происходящие в горнотехнических объектах, контролируются посредством автоматизированных гидрогеологических и геофизических измерений. Применение сейсмотомографии и георадарного подповерхностного зондирования позволяет уточнить и детализировать влагонасыщенность и изменение механических свойств пород на глубину до 10-20 м от поверхности. [3, 8].

Наземный уровень. Смещения и деформации природно-технических объектов, а также дневной поверхности сопряженной с ними геологической среды достаточно уверенно и с высокой точностью определяются классической (нивелирование и полигонометрия) геодезией. При этом одним из основных условий является передача и подтверждение координат опорных точек. Дополнительно для целей детализированного мониторинга горнотехнических объектов, решения задач их устойчивости и создания цифровых моделей применяется лазерное и радарное сканирование [3, 11, 12].

Воздушный уровень. Мониторинг площадных и линейно-протяженных горнотехнических объектов осуществляется с применением аэрофотосъемки и цифровой обработки оптических, мультиспектральных и радарных снимков, выполненных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [3]. Для этих целей могут применяться БПЛА как самолетного, так и вертолетного типов, с автоматическим проведением аэрофотосъемочных работ и с автоматизированной обработкой данных аэрофотосъемки. По данным аэрофотосъемки и привязки (телеметрия полета, наземные опорные точки)

создается текстурированная 3D-модель местности, матрица высот и ортофотоплан различных масштабов.

Спутниковый уровень. Для определения плановых координат наблюдательных пунктов необходимо применение GPS-геодезии по технологии “статика” и прямыми измерениями [3, 9, 10, 11, 13]. Для геомониторинга площадных и линейно-протяженных объектов целесообразно использовать данные цифровой обработки оптических, спектральных и радарных спутниковых снимков. Из отдельных спутниковых снимков, имеющих перекрытия, монтируются фотосхемы (фотомозаики) или фотокарты с топографической привязкой опорных точек, что достаточно для создания 3D-моделей объектов. Применение спектральных съемок позволяет определить свойства исследуемой поверхности и решать ряд экологических задач. Отличительной особенностью спутниковой радарной съемки является ее выполнение при любой погоде и в любое время суток. На радарных снимках хорошо идентифицируются рельеф и шероховатость поверхности, ее влажность, иногда – подповерхностные структуры.

Компьютерный уровень. В задачи комплексного мониторинга, в целях оценки и прогноза геогидромеханического состояния горнотехнических объектов и тенденций их изменения, должно входить компьютерное моделирование на основе специализированных программных комплексов. Цифровые 2D- и 3D-модели горнотехнического объекта должны разрабатываться и корректироваться с учетом инструментальных геомеханических, геодезических, георадарных и гидрологических измерений не реже одного раза в год [14]. Геомеханическое моделирование направлено на прогноз механического состояния и оценку устойчивости горнотехнического сооружения. Для геогидродинамического моделирования реализован принцип интегрирования геолого-геометрических (геологические и пространственные характеристики пород), геомеханических (механические свойства и действующие нагрузки), гидростатических (степень водонасыщения пород, разность напоров различных водоносных горизонтов, а также положение депрессионной плоскости) и гидродинамических (образование зон фильтрации, скорость и давление потока) условий. Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами, выполнять и гидравлические, с оценкой интегральной надежности природно-технического сооружения.

Концепция мониторинга. Современные мировые и отечественные разработки систем мониторинга базируются на использовании информационных технологий «BIG DATA» и «CLOUD SERVICE» с элементами инноваций [3, 9, 12, 15, 16]. Предлагаемая нами концепция системы многоуровневого комплексного мониторинга геогидромеханического состояния горнотехни-

ческих объектов включает в себя следующие основные модули: многоуровневые измерения и исследования; логическая обработка и систематизация данных с применением информационных технологий «BIG DATA» и «CLOUD SERVICE»; актуализация 2D- и 3D-моделей и компьютерное исследование их для измеренных природных и техногенных воздействий; интерактивное сопоставление с пороговыми значениями опасных геоиндикаторов и имеющимися знаниями; принятие управляющих решений (рис. 3). Посредством системы поддержки принятия решений, использующей знания в междисциплинарных областях применяемых методов и исследований, выполняется качественная и количественная оценка рисков развития опасных геомеханических и гидродинамических процессов, на основании чего экспертно принимаются управляющие решения по превентивным мероприятиям в целях минимизации аварий и чрезвычайных ситуаций.

Натурные междисциплинарные многоуровневые исследования составляют основу мониторинга, результаты которого и полученные данные постоянно дополняют и обновляют базы данных. С применением информационных технологий «BIG DATA» и «CLOUD SERVICE» данные обрабатываются, систематизируются и в интерактивном режиме сопоставляются с имеющимися знаниями.

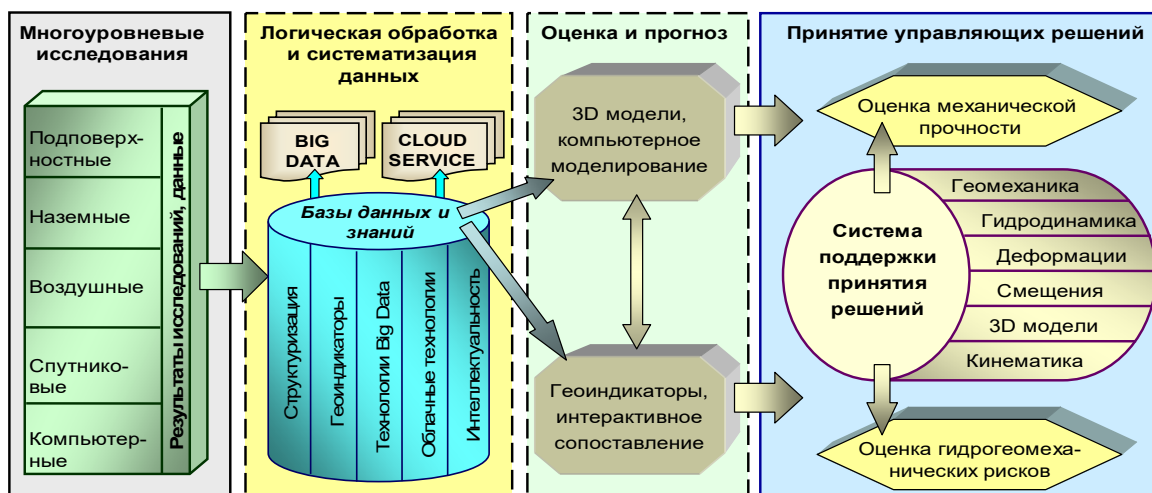


Рисунок 3 - Концепция системы многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов

Таким образом, целеполагание концепции многоуровневого комплексного мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических сооружений имеет инновационный характер. Оно направлено на то, чтобы применять и комплексировать методы, средства и технологии, которые позволяли бы получать новые знания, и использовать их с применением инновационных подходов для генерирования знаний более высокого уровня.

Вывод. Разработана концепция многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов горнодобывающих комплексов, в основу которого положен принцип комплексирования междисциплинарных исследований, включающих в себя: наземные и GPS геодезические, гидрологические, геомеханические и геофизические измерения, а также подповерхностные, наземные, воздушные и спутниковые георадарные съемки. Мониторинг предусматривает выполнение натуральных режимных измерений на различных уровнях, соотнесенных с дневной поверхностью: дистанционном (удаленным надповерхностным) (GPS геодезия, спутниковые оптические и радарные снимки); воздушном (надповерхностным) (оптическая, тепловая и радарная аэрофотосъемки с применением БПЛА); наземном (визуальные наблюдения, фотофиксация, геодезические измерения, лазерное и радарное сканирование); подповерхностном (гидрологические (пьезометрические) измерения, георадарное зондирование, сейсмотомография); компьютерном (мультиповерхностным) (геомеханическое, гидрогеомеханическое, сценарное и ситуационное моделирование). Многоуровневый подход должен быть применен при построении 2D и 3D моделей и их геомеханическом и геогидромеханическом исследовании (моделировании). Предложены методические подходы, позволяющие адаптировать стандартные методы к целям многоуровневого мониторинга горнотехнических сооружений для минимизации рисков техногенных катастроф и экологических последствий горнодобывающей деятельности. Основные положения концепции многоуровневого мониторинга горнотехнических объектов апробированы на горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-технический прогресс на горнорудных предприятиях Заполярья / Н.Н. Мельников, П.А. Усачев, Ю.В. Демидов и др. - Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1988. - 239с.
2. Мельников Н.Н. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник // Арктика: экология и экономика. - 2015. - № 3 (19). - С. 66 - 75.
3. Мельников Н.Н. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Н.А. Калашник, Д.В. Запорожец // ФТПРПИ. - 2018. - №4. - С.1-8.
4. Zaki M.J. Data mining and analysis, Fundamental Concepts and Algorithm / M.J. Zaki, M.Jr. Vagner - New York, Cambridge University Press, 2014. - 607 p.
5. Мосейкин В.В. Совершенствование удаленного автоматизированного контроля откосных сооружений на горных предприятиях / В.В. Мосейкин, А.М. Гальперин, В.В. Ческидов, С.А. Пуневский // Горный журнал. - 2017. - № 12. - С. 82-86.

6. Козырев А.А. Концепция организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики / А.А. Козырев, А.И. Калашник, Э.В. Каспарьян, С.Н. Савченко // Вестник МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. университета. - 2011. - Т. 14. - № 3. - С.587-600.
7. Данилкин А.А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А.А. Данилкин, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Д.А. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2014. - № 7. - С. 344-351.
8. Мельников Н.Н. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, А.Ю. Дьяков, Д.А. Максимов // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2016. - № 1. - С. 39 - 49.
9. Кожаев Ж.Т. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж.Т. Кожаев, М.А. Мухамедгалиева, Б.Б. Имансакипова, М.Г. Мустафин // Горный журнал. - 2017. - № 2. - С. 39 - 44.
10. Ferretti A. Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space / A. Ferretti - EAGE Publications bv, 2014. - 160 p.
11. Hartwig M.E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms / M.E. Hartwig // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2016. - Vol. 75(2). - Iss. 2. - P. 605 - 621.
12. Naticchia B. A monitoring system for real-time interference control on large construction sites / B. Naticchia, M. Vaccarini, A. Carbonari // Automation in Construction. – 2013. - Vol. 29. - P. 148 - 160.
13. Costantini M. Operational monitoring of mines by COSMO-SkyMed PSP SAR interferometry / M. Costantini, F. Malvarosa, F. Minati, L.M. De Assis // European Space Agency. (Special Publication). - 2016. - ESA SP-740
14. Калашник А.И. Методология применения информационных технологий при освоении минерально-сырьевых ресурсов Кольского полуострова / А.И. Калашник // Наука и образование. 10 лет вместе. – 2005. - 132-139.
15. Бычков И.В. Горная информатика и проблема "больших данных" в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования / И.В. Бычков, Д.Я. Владимиров, В.Н. Опарин, В.П. Потапов, Ю.И. Шокин // ФТПРПИ. - 2016. - № 6. - С. 163 - 179.
16. Зеленцов В.А. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов / В.А. Зеленцов, А.П. Ковалев, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Тр. СПИИРАН. - 2013. - № 5(28). - С. 7 - 81.