

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.838 : 626/627 (470.21)

### КОМПЛЕКСНАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ГЕОМОНИТОРИНГА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

**Н. Н. Мельников**, А. И. Калашник, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru,  
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Разработана система многоуровневого комплексного геомониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части Российского сектора Арктики, в основу которой положен принцип синхронизации междисциплинарных исследований, включающих в себя наземные и GPS геодезические, геомеханические, геофизические и геотехнические измерения, а также подповерхностные, наземные, воздушные и спутниковые георадарные съемки. Система базируется на информационных технологиях “BIG DATA” и “CLOUD SERVICE” с элементами интеллектуальности и подразумевает проведение режимных измерений на различных уровнях: дистанционном, воздушном, наземном, подповерхностном и компьютерном. Натурные междисциплинарные многоуровневые исследования составляют основу геомониторинга, в результате которого полученные данные постоянно дополняют и обновляют базы данных. Многоуровневый подход использован и в компьютерном моделировании: созданы геодинамические модели горнотехнического объекта, Кольского полуострова, Балтийского щита и Евразийской плиты как иерархически вложенных структур. Модели исследованы при различных вариантах граничных условий, что позволило решить обратную задачу оценки напряженно-деформированного состояния приповерхностной части горных пород дифференцированно по масштабам исследования. Система многоуровневого геомониторинга реализована применительно к природно-техническим объектам основных добывающих предприятий Кольского полуострова: АО “Ковдорский ГОК”, АО “Кольская ГМК”, АО “Апатит”, ГОК “Олений ручей”, ГОК “ОЛКОН”.

*Многоуровневый мониторинг, междисциплинарные комплексные исследования, природно-технические объекты, горнодобывающие комплексы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180401

В западной части Российского сектора Арктики сосредоточено значительное число крупных горнодобывающих комплексов, которые наряду с их большой социально-экономической значимостью оказывают существенное влияние на окружающую природную среду. На Кольском полуострове и в шельфовой зоне Баренцева и Белого морей происходят опасные геомеханические процессы и природно-техногенные землетрясения магнитудой свыше 4, приводящие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооруже-

ний и коммуникаций. Активизируются современные тектонические движения земной коры, которые, в свою очередь, осложняют ведение работ и снижают промышленную и экологическую безопасность. Для успешного решения задач геодинамической и экологической безопасности горнодобывающих предприятий в регионе необходимы организация и проведение системного геомониторинга горнотехнических сооружений и сопряженной с ними геологической среды, организованного на различных масштабных и измерительных уровнях [1]. Это позволит выявить 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 самих объектов, так и окружающей природно-технической среды. Эти проявления также могут быть “спусковым механизмом” для разрушений природно-технических 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 долларов [1–4].

#### КОНЦЕПЦИЯ МОНИТОРИНГА

Основная идея обеспечения промышленной безопасности природно-технических объектов горнодобывающих комплексов заключается в перспективном и стратегическом решении задач обеспечения их механической устойчивости и функциональности при природных и техногенных воздействиях [1, 5]. Природное воздействие на природно-технический 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. (рис. 1). 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 природно-технического объекта, а также сопряженной с ним геологической среды.

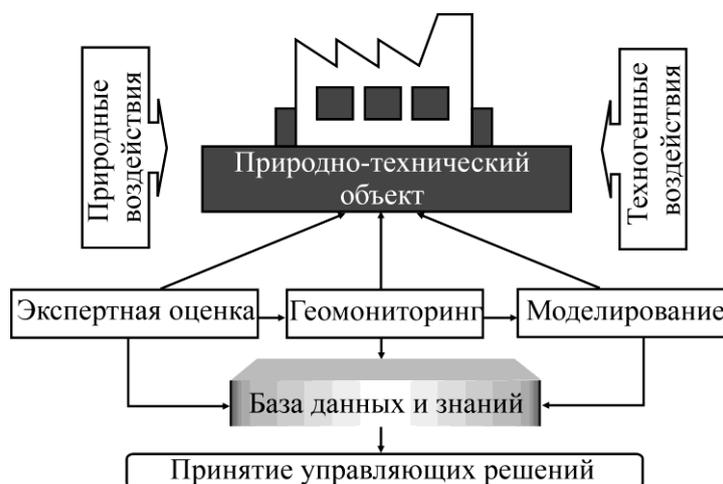


Рис. 1. Концептуальная структура обеспечения геодинамической безопасности природно-технического объекта

Обязательным условием обеспечения безопасности природно-технического объекта является комплексный многоуровневый геомониторинг, проведение которого позволит выявить на ранней стадии развитие опасных деформационных процессов. Важную роль при этом играют экспертная оценка механического состояния и функциональности сооружения, а также возможность прогнозирования на основе создания компьютерных моделей и моделирования различных вариантов развития ситуации [6]. В комплексе с использованием баз данных и этих знаний становится возможным своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

Для этих целей в Горном институте КНЦ РАН (г. Апатиты) создается комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов, базирующаяся на комплексировании междисциплинарных натурных наблюдений и компьютерном геофлюидомеханическом моделировании [1]. В различных модификациях система геомониторинга апробирована на крупных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова: АО “Ковдорский ГОК”, АО “Кольская ГМК”, АО “Апатит”, ГОК “Олений ручей”, ГОК “ОЛКОН”, а также на ряде гидротехнических сооружений различного назначения: ГЭС, ТЭЦ, накопителях жидких промышленных отходов перерабатывающих и металлургических предприятий [6, 7].

### КОМПЛЕКСНЫЙ МНОГОУРОВНЕВЫЙ ГЕОМОНИТОРИНГ

В системной структуре комплексного многоуровневого геомониторинга природно-технических 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 [8–11], а также компьютерное геомеханическое и геофлюидодинамическое моделирование [12] (рис. 2).



Рис. 2. Системная структура комплексного многоуровневого геомониторинга природно-технических объектов

Выполнение геомониторинга 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 геофлюидодинамическом исследовании (моделировании).

*Подповерхностный уровень.* Деформационно-фильтрационные процессы, происходящие в горных природно-технических объектах, контролируются посредством автоматизированных

геофизических и гидрогеологических измерений. Применение сейсмотомографии позволяет уточнить влагонасыщенность и изменение механических свойств пород на глубину до 10 м. Георадарное подповерхностное зондирование с высокой информативностью и оперативностью дополняет и детализирует сейсмотомографическую информацию на глубину до 40 м в реальном режиме времени и с привязкой GPS (рис. 3) [7].

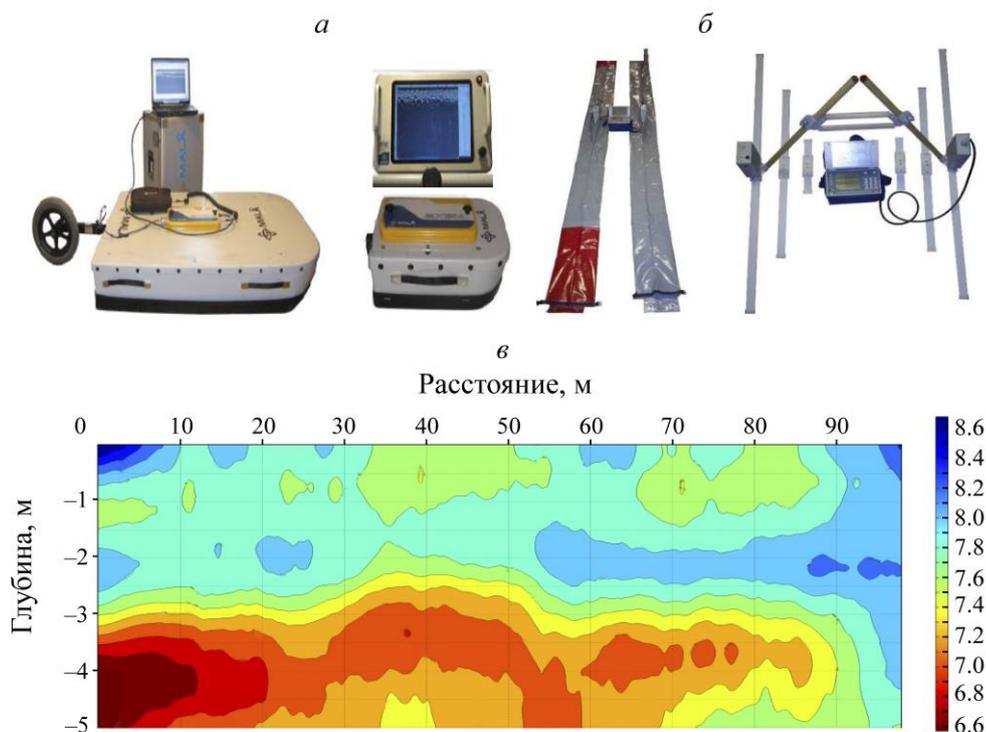


Рис. 3. Георадарные комплексы RAMAC (а), ЛОЗА (б), радарограмма (в)

*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 геомониторинга и решения задач устойчивости сложноповерхностных природно-технических объектов горнодобывающих предприятий Кольского полуострова применяется лазерное и радарное сканирование [6].

*Воздушный уровень.* Мониторинг площадных и линейно-протяженных природно-технических объектов осуществляется с применением аэрофотосъемки и цифровой обработки оптических, мультиспектральных и радарных снимков, выполненных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 6]. Для этих целей применялись БПЛА как самолетного, так и вертолетного типов, с автоматическим проведением аэрофотосъемочных работ и с автоматизированной обработкой данных аэрофотосъемки с помощью фотограмметрического программного обеспечения. 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 применялась GPS-геодезия по технологии “статика” и прямые измерения. В качестве примера

на рис. 4а приведена схема контрольно-наблюдательных геодезических реперов и GPS-геодезия измерений на промплощадке АО “Ковдорский ГОК”. Для геомониторинга площадных и линейно-протяженных объектов использовались данные цифровой обработки оптических, спектральных и радарных спутниковых снимков. Спутниковые фотоаппараты в зависимости от наклона оптической оси дают возможность получать плановые и перспективные снимки земной поверхности, имеющие хорошие геометрические свойства и высокое качество изображения. Масштабы оптической съемки зависят от высоты фотографирования и фокусного расстояния аппарата. Из отдельных спутниковых снимков, имеющих перекрытия, монтируются фото-схемы (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.

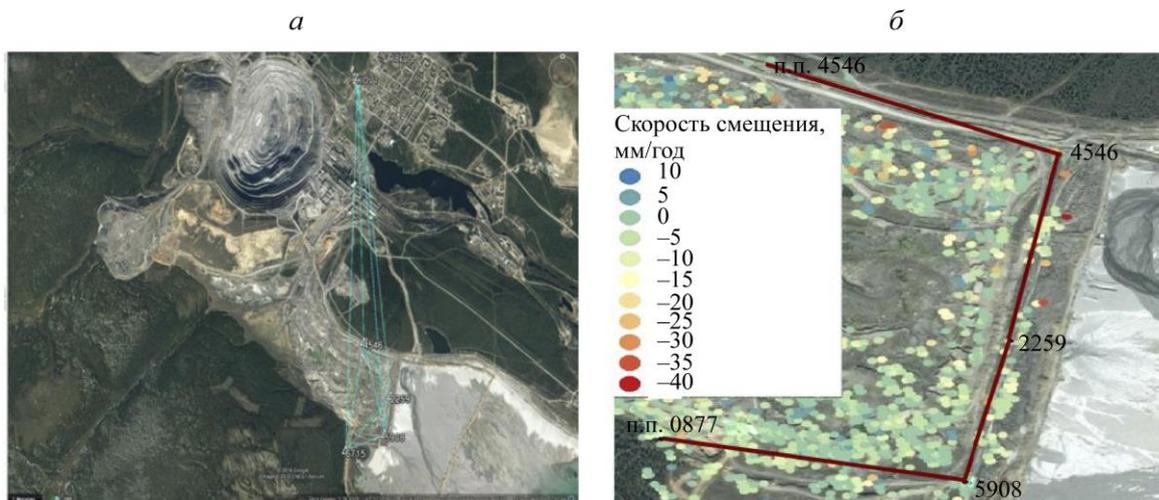


Рис. 4. Схема проведения GPS-измерений (а) и карта скоростей вертикальных смещений по данным интерферометрической обработки снимков спутника Sentinel-1A (б) на промплощадке АО “Ковдорский ГОК”

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. Для целей мониторинга площадных смещений объектов гидротехнических сооружений используются архивные и оперативные спутниковые радарные данные с интерферометрической обработкой. Использованы снимки как с российских спутников “Ресурс-М” и “Метеор-П”, так и с европейских. Европейское космическое агентство ESA предоставило авторам доступ к радарным данным спутников Sentinel-1A\B, которые осуществляют постоянную съемку в режиме Interferometric Wide Swath. На рис. 4б приведен пример карты скоростей вертикальных смещений по данным интерферометрической обработки снимков спутника Sentinel-1A на хвостохранилище АО “Ковдорский ГОК”.

*Компьютерный уровень.* В задачи комплексного геомониторинга, в целях прогноза геомеханического состояния природно-технических объектов и тенденций их изменения, должно входить компьютерное моделирование на основе специализированного программного комплекса (в частности, PLAXIS 3D). Цифровые 2D- и 3D-модели природно-технического объекта должны разрабатываться и корректироваться с учетом инструментальных геомеханических, геодезических, георадарных и гидрологических измерений не реже одного раза в год [12]. Гео-

механическое моделирование направлено на прогноз механического состояния и оценку надежности природно-технического сооружения. Для геофлюидодинамического 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 (рис. 5).

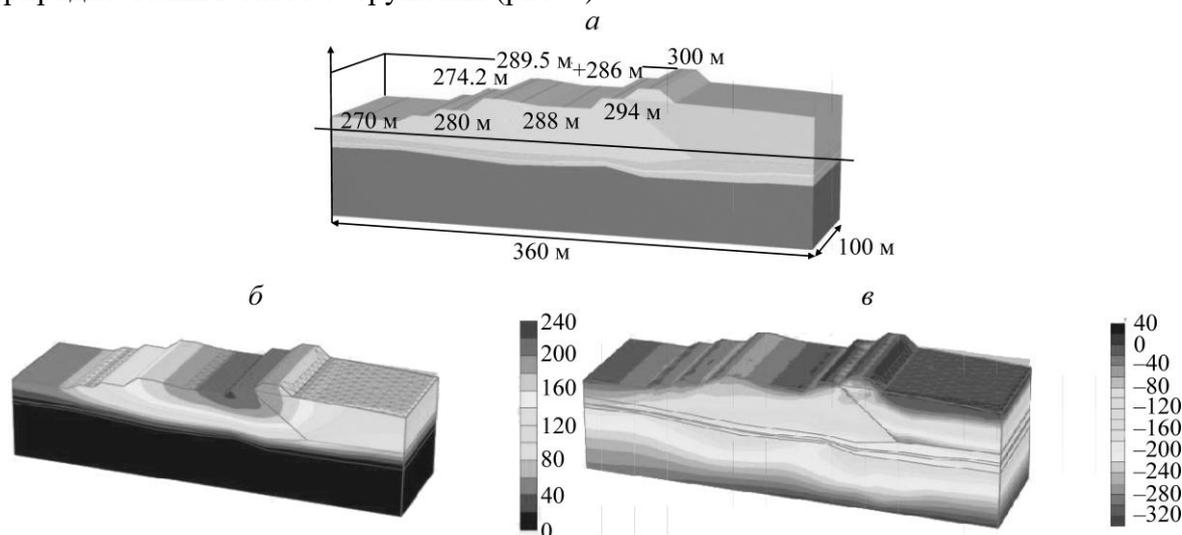


Рис. 5. 3D-модель и результаты геофлюидодинамического моделирования природно-технического объекта: *а* — геометрическая схема; *б* — смещения; *в* — активное поровое давление

### КОГНИТИВНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

Современные мировые и отечественные разработки систем мониторинга базируются на использовании информационных технологий “BIG DATA” и “CLOUD SERVICE” с элементами интеллектуальности [2, 4, 5, 8, 9, 13, 14]. Предлагаемая нами когнитивная структура развиваемой системы комплексного многоуровневого геомониторинга 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. 6). Посредством системы поддержки принятия решений, использующей знания в междисциплинарных областях применяемых методов и исследований, выполняется качественная и количественная оценка рисков развития опасных геомеханических и геодинамических 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.

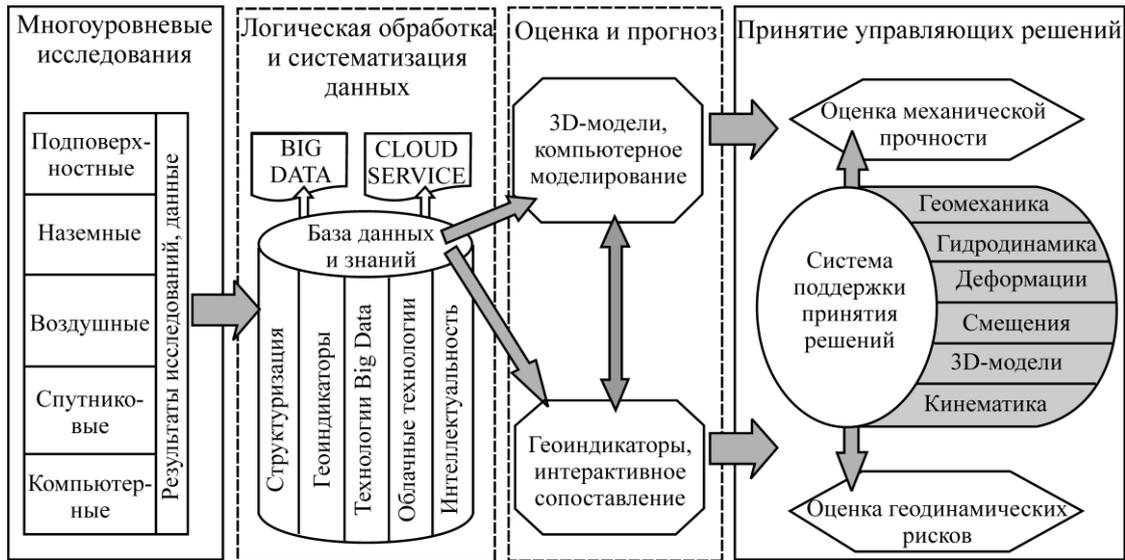


Рис. 6. Когнитивная структура системы комплексного многоуровневого геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов

Многоуровневый подход использован и в компьютерном моделировании: созданы 3D-геодинамические модели Кольского полуострова, региона добывающего предприятия и конкретного природно-технического объекта как иерархически вложенных структур. Модели исследованы при различных вариантах граничных условий, что позволило в каждом случае решить обратную задачу оценки напряженно-деформированного состояния дифференцированно по объектам исследования, с учетом комплексного анализа данных определения векторов и скоростей смещения станций ГНСС, расположенных в регионе, и результатов интерферометрической обработки радарных снимков спутников Sentinel-1.

Таким образом, развиваемая система комплексного многоуровневого геомониторинга природно-технических сооружений имеет когнитивный характер. Она направлена на то, чтобы создать комплекс методов, инструментов и технологий, которые позволяли бы получать новые знания и использовать их с применением элементов интеллектуальности, для генерирования знаний более высокого уровня. Примеры таких подходов изложены в работах отечественных и зарубежных исследователей [2, 4, 1, 8, 13, 14].

## ВЫВОДЫ

В Горном институте КНЦ РАН создана комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов, в основу которой положен принцип проведения системных междисциплинарных синхронизированных исследований. Проведение геомониторинга с помощью наблюдений на различных уровнях дает возможность выявлять опасные деформационно-фильтрационные процессы на ранних стадиях их формирования в природно-технических объектах, своевременно реагировать и принимать управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации. Опыт выполнения исследований на основных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова позволяет констатировать, что созданная комплексная многоуровневая система геомониторинга является эффективной и высокоинформативной для решения разнообразных задач горного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н. Н., Калашник А. И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части Российского сектора Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 66–75.
2. Бычков И. В., Владимиров Д. Я., Опарин В. Н., Потапов В. П., Шокин Ю. И. Горная информатика и проблема “больших данных” в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 163–179.
3. Hartwig M. E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms // Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, Vol. 75 (2). — P. 605–621.
4. Алабян А. М., Зеленцов В. А., Крыленко И. Н., Потрясаев С. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестн. Российской академии наук. — 2016. — Т. 86. — № 2. — С. 127–137
5. Jiang H., Lin P., Fan Q., Qiang M. Real-time safety risk assessment based on a real-time location system for hydropower construction sites, The Scientific World Journal, 2014, Article ID 235970. — 14 p.
6. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // Вестн. МГТУ. — 2017. — Т. 20. — № 1. — С. 13–20.
7. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Максимов Д. А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части Российского сектора Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2016. — № 1. — С. 39–49.
8. Зеленцов В. А., Ковалев А. П., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Тр. СПИИРАН. — 2013. — № 5 (28). — С. 7–81.
9. Кожаев Ж. Т., Мухамедгалиева М. А., Имансакипова Б. Б., Мустафин М. Г. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии // Горн. журн. — 2017. — № 2. — С. 39–44.
10. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Голубев В. И., Дмитриев П. Н., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Обобщение опыта применения различных методов обработки РСА снимков для изучения и мониторинга оползневой активности склонов в районе Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т. 13. — № 6. — С. 137–147.
11. Ferretti A. Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space, EAGE Publications bv, 2014. — 160 p.
12. Калашник Н. А. Компьютерное моделирование механической прочности и противофильтрационной функциональности ограждающей дамбы хвостохранилища // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. — 2016. — № 3. — С. 304–308.
13. Zaki M. J., Vagner M. Jr. Data mining and analysis, Fundamental Concepts and Algorithm, New York, Cambridge University Press, 2014. — 607 p.
14. Naticchia B., Vaccarini M., Carbonari A. A monitoring system for real-time interference control on large construction sites, Automation in Construction, 2013, Vol. 29. — P. 148–160.

Поступила в редакцию 2/VII 2018