

УДК 622.831.325:622.276(985)

Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики

Н. Н. Мельников¹, академик,

А. И. Калашник², кандидат технических наук

ФГБУН Горный институт Кольского научного центра РАН

Применительно к горнотехническим и нефтегазовым объектам западной части российского сектора Арктики обосновано создание системы многоуровневого геодинамического мониторинга геологической среды, в основу которой положен принцип проведения мультидисциплинарных исследований.

Ключевые слова: Арктика, горнотехнические предприятия, нефтегазовые объекты, безопасность, геодинамический мониторинг, система, мультидисциплинарность, организация.

Введение

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено более 300 промышленных объектов, которые отнесены к категории особо ответственных. Это рудники, карьеры и технические сооружения крупных горнодобывающих предприятий: АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», АО «Ловозерский ГОК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, а также гидротехнические сооружения (ГТС) различного назначения: ГЭС, ТЭЦ, хвосты и шламохранилища горно-перерабатывающих и металлургических предприятий [6; 9]. Сюда же следует отнести нефтегазообъекты (платформы, добычные приповерхностные и подводные модули, технологические и транспортные трубопроводы, временные хранилища, приемные и перевалочные прибрежные терминалы, заводы по переработке, магистральные транспортные нефтегазопроводы и т. п.), которые в перспективе развития добычи нефти и газа на шельфе Баренцева, Печорского и Карского морей и последующего трубопроводного транспортирования углеводородов потребителям будут в значительной степени сконцентрированы в данном регионе [17].

Наряду с суровыми арктическими условиями геологическая среда западной части российского сектора Арктики, особенно Кольского полуострова,

является геодинамически активной — здесь инструментально регистрируются природно-техногенные опасные геомеханические процессы и геодинамические проявления различного масштаба [5; 17]. В центральной части Кольского полуострова вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горных работ.

Необходимо также выделить специфические для Кольского полуострова горно-геологические и индустриально-промышленные особенности:

- высокое напряженно-деформированное состояние массивов пород верхней части земной коры с преобладанием субгоризонтальной тектонической составляющей, которая может превышать собственный вес пород в два-три раза [4];
- гляциоизостатическое поднятие (всплывание) земной коры — при этом крупные геологические блоки по-разному и неравномерно смещаются по разломам [22];
- сейсмичность как природного, так и техногенного характера, имеющую ярко выраженную зональность, приуроченную к прибрежным зонам и центральной части Кольского полуострова [5];

¹ e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

² e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru.

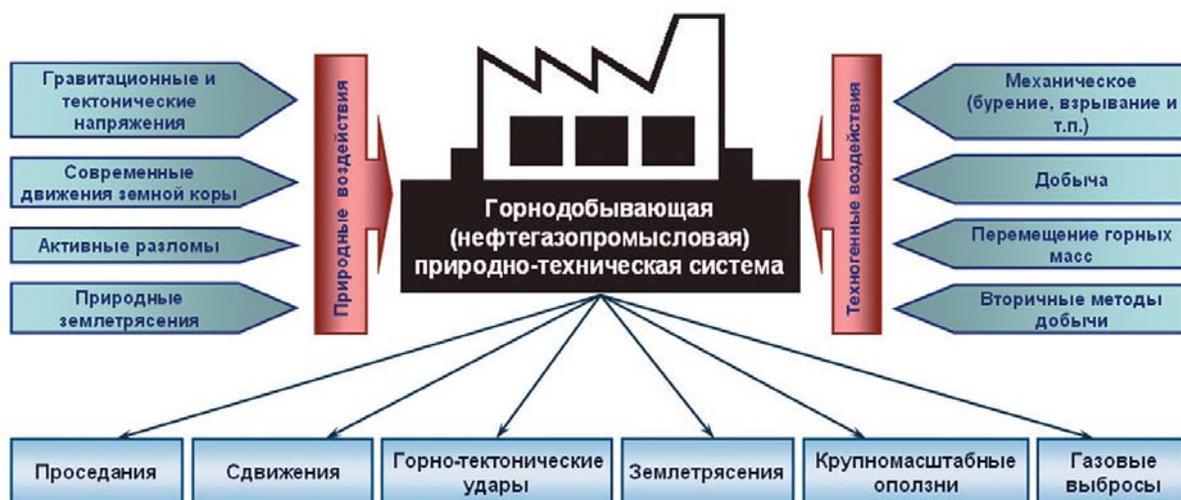


Рис. 1. Воздействие на горнодобывающую (нефтегазовую) природно-техническую систему, приводящее к геодинамическим проявлениям

- изменчивость рельефа земной поверхности в окрестности ответственных объектов с перепадом высот до 200—500 м [11];
- крупномасштабная и интенсивная разработка горнорудных месторождений подземным и открытым способами с перемещением огромных объемов породных масс [19];
- большое число сопряженных с ответственными объектами озер и рек, имеющих социально-экономическое значение (источники водоснабжения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, ГЭС и т. п.);
- наличие в регионе атомных объектов (Кольская атомная электростанция — работающие блоки и строительство второй очереди, пункт долговременного хранения радиоактивных отходов в губе Сайда, пункт временного хранения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в губе Андреева и др.);
- наличие крупных морских портов: Мурманского, Кандалахского и Витино;
- наличие ряда военных объектов стратегического и регионального значения.

Воздействие на природно-технические системы

Крупномасштабная разработка месторождений полезных ископаемых оказывает существенное воздействие на земную кору региона, что приводит к нарушению естественного относительно равновесного состояния недр, активизации тектонических разломов и современных движений земной коры, инициирующих, в свою очередь, опасные геодинамические проявления (проседания, сдвигения (подвижки) пород, горно-тектонические удары, землетрясения, крупномасштабные оползни, газовые выбросы и др.) [3; 12; 17; 20]. Эти природные и природно-техногенные явления также могут быть

«спусковым механизмом» для вторичных собственных проявлений, что приведет к еще большим разрушениям и авариям поврежденных при первичных проявлениях сооружений.

Горнодобывающая (нефтегазопромысловая) природно-техническая система (ПТС) с сопряженным участком геологической среды также испытывает воздействие различного рода сил и нагрузок (рис. 1) [17; 18]. Природное воздействие на ПТС подразумевает действие гравитационных и тектонических сил, эффекты от современных движений земной коры, процессы по активным разломам, природные землетрясения и др. Техногенное воздействие на ПТС обусловлено механическим разбуриванием пород, их взрывной отбойкой, извлечением полезного ископаемого (руды, углеводородного сырья), крупномасштабным перемещением породных масс («вскрыша», «пустые породы», отходы переработки обогащательных фабрик и т. п.), применением повторных (вторичных) методов (переработка отвалов горных пород, хвостохранилищ; закачка воды в продуктивный пласт и/или другие методы механического повышения нефтегазоотдачи). Совместное интегрированное воздействие приводит к изменению напряженно-деформированного состояния пород геологической среды, сопряженной с горнодобывающей (нефтегазопромысловой) природно-технической системой, обуславливающему формирование опасных геомеханических процессов и условий для реализации деформирующих и разрушающих ПТС геодинамических проявлений (проседания и сдвигения массивов горных пород, горно-тектонические удары, землетрясения, крупномасштабные оползни, газовые выбросы и т. п.).

Сказанное подтверждается инструментальными измерениями и мониторингом с использованием стационарных сейсмостанций на Кольском полуострове, в результате чего установлены современные

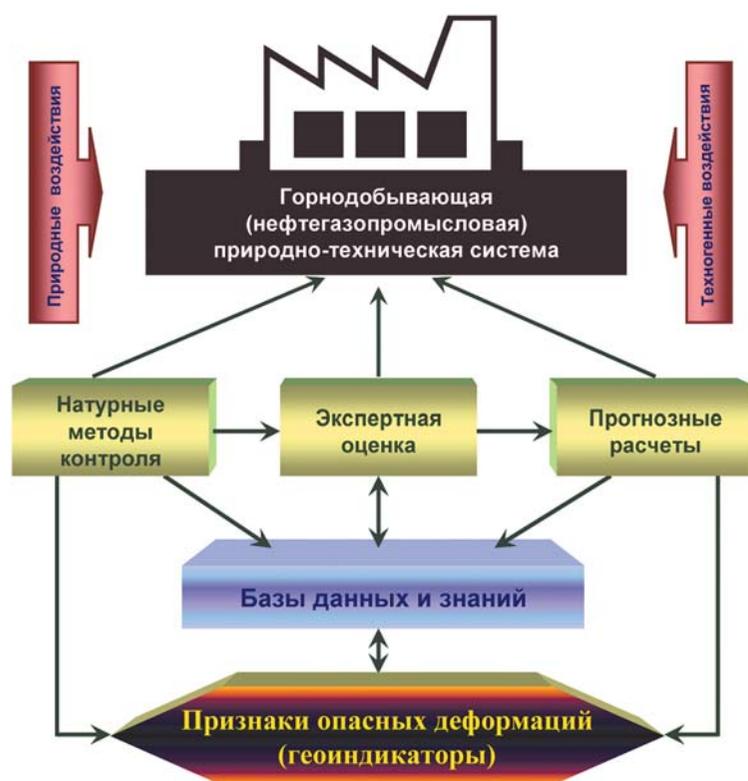


Рис. 2. Общая структура и принципы геодинамического мониторинга горнодобывающих и нефтегазовых природно-технических систем западной части российского сектора Арктики

интенсивные разнонаправленные движения геологических блоков верхней части земной коры и повышенная активность Мурманской и Кандалакшской сейсмогенных зон, в пределах которых происходят землетрясения магнитудой до 3—4 [5]. Выявлено, что непосредственно в районе планируемого строительства завода сжиженного природного газа (СПГ) у населенного пункта Териберка в начале XX в. произошло сильное землетрясение. В центральной части Кольского полуострова вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях постоянно регистрируются горно-тектонические удары и близповерхностные землетрясения магнитудой свыше 3.

Поэтому, по мнению авторов, основная идея концептуальных подходов к обеспечению эффективного, безопасного и экологически приемлемого освоения рудных и нефтегазовых ресурсов западной части российского сектора Арктики базируется на перспективном и стратегическом решении задач геодинамической безопасности горнодобывающих и нефтегазовых природно-технических систем. Обязательным условием обеспечения геодинамической безопасности должен являться многоуровневый системный мониторинг геологической среды, проведение которого позволит выявить на ранней стадии развитие опасных деформационных процессов и своевременно принять управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации. В данной работе авторы рассматривают создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнодобывающих и нефтегазовых объектов применительно к условиям западной части российского сектора Арктики, учитывающей тектонофизические особенности региона и включающей комплексы мультидисциплинарных натуральных измерений потенциально опасных зон, прогнозных расчетов и компьютерного моделирования, экспертных оценок природных

и техногенных воздействий на объекты в целях прогнозирования и обнаружения на ранних стадиях признаков возникновения опасных деформационных процессов для принятия управляющих решений и проведения превентивных мероприятий.

Принципы создания системы геодинамического мониторинга

Геодинамический мониторинг состояния основных сооружений горного и нефтегазового комплексов должен в первую очередь базироваться на системных принципах, поскольку указанные сооружения образуют специфические эволюционирующие природно-технические системы «добычные сооружения — геологическая среда» [15].

Специфика этих систем заключается в особой ответственности с точки зрения обеспечения их функционального назначения, промышленной безопасности, безаварийной работы сооружений с учетом большой длительности их существования и объемных крупномасштабных форм. При рассмотрении вопросов создания системы геодинамического мониторинга горнодобывающих и нефтегазовых объектов в условиях арктических районов приходится дополнительно учитывать пониженную способность природных систем к восстановлению, а потому повышать степень надежности разрабатываемых мер для исключения возможных аварий.

Общая структура и принципы создания системы геодинамического мониторинга горнодобывающих и нефтегазовых природно-технических систем западной части российского сектора Арктики представлены на рис. 2 и включают:

- идентификацию опасностей, оценку геодинамического риска и районирование горных отводов с выделением потенциально геодинамически опасных участков;
- выбор, обоснование и оценку возможных значений приоритетных контролируемых параметров;

- выбор и обоснование методов и средств для натурных измерений (определений) контролируемых параметров;
- оборудование наблюдательных пунктов (полигонов) на потенциально геодинамически опасных участках;
- измерения (определения) значений контролируемых параметров в натуральных условиях;
- прогнозные расчеты значений параметров (геоиндикаторов), соответствующих опасному геодинамическому проявлению;
- формирование баз данных результатов натурных наблюдений и расчетных значений параметров, а также баз нормативно-регламентирующих и методических знаний;
- обработку, логическое структурирование и интеллектуальный анализ результатов наблюдений и расчетов;
- экспертную оценку результатов анализа и геоиндикаторов для выявления признаков формирования опасных процессов в геологической среде горнотехнической (нефтегазовой) природно-технической системы.

Реализация данных принципов геодинамического мониторинга позволит оперативно выполнять оценку текущего состояния контролируемых объектов и прогнозировать тенденции его изменения, принимать на этой основе целеполагающие управленческие решения и применять в случае необходимости превентивные защитные мероприятия. В дальнейшем мониторинг позволит среди прочего осуществлять контроль эффективности реализации принятых решений и превентивных мероприятий.

В развитие методологических подходов, изложенных в [16], авторы систематизировали мультidisциплинарные методы и средства для проведения мониторинга изменяющихся параметров геолого-геофизической среды, смещений и деформаций земной поверхности и сооружений, а также физических полей в геологической среде. Наряду с уже традиционными сейсмическими и сейсмологическими методами для мониторинга геолого-геофизической среды предлагается использовать георадарное зондирование, достаточно хорошо зарекомендовавшее себя при мониторинге горнотехнических систем [2; 7]. Смещения и деформации дневной поверхности и горнотехнических (нефтегазопромысловых) объектов уверенно и с высокой точностью определяют классической (нивелирование и полигонометрия) и космической геодезией: GPS определения и спутниковая георадарная съемка [14; 15; 21]. Дополнительное использование данных гидрогеологических наблюдений позволяет получить более полную картину результирующих смещений с учетом глубинных процессов. Для мониторинга физических полей в горно-геологической среде целесообразно комплексирование методов геомеханики, компьютерного моделирования и современной геодинамики [15; 16].

Таким образом, создаваемая в Горном институте Кольского научного центра (КНЦ) РАН система многоуровневого геодинамического мониторинга западной части российского сектора Арктики учитывает арктические условия и тектонофизические особенности региона и включает мультidisциплинарные методы и способы контроля параметров откликов геолого-геофизической среды (сейсмические и сейсмологические методы, поверхностное и подповерхностное зондирование), измерения поверхностных и внутренних деформаций и перемещений (наземная и спутниковая геодезия, спутниковая георадарная съемка, гидрогеологические методы), контроль особенностей трансформации природно-техногенных физических полей в геологической среде (геомеханические методы в комплексе с компьютерным моделированием и современной геодинамикой) (рис. 3). Комплексирование натурных измерений, прогнозных расчетов и компьютерного моделирования, методов тектонофизики и современной геодинамики позволяет повысить надежность и достоверность прогнозирования и обнаружения на ранних стадиях признаков возникновения опасных деформационных процессов. Полученные данные будут интегрироваться в «Базу данных и параметров», в которой в автоматизированном режиме будут выполняться их логическая обработка и сопоставление с нормативными и предельными значениями. На этой основе формируется экспертная оценка текущего и прогнозного состояния горнотехнического (нефтегазового) объекта и принимаются управляющие решения, в том числе по разработке в случае необходимости превентивных и защитных мероприятий.

Создание систем мониторинга должно начинаться с самых первых стадий освоения месторождений, при этом на каждой стадии будут решаться различные задачи, но все они должны быть направлены на минимизацию возможных отклонений объектов от нормальной эксплуатации и снижение воздействия на окружающую среду. Научное геомеханическое сопровождение каждого этапа жизненного цикла горнодобывающего или нефтегазового объекта предлагается выполнять по алгоритму «планирование работ — идентификация опасностей — оценка геодинамического риска — превентивные инженерно-технические мероприятия по уменьшению риска — природоохранные мероприятия — строительство — добыча/транспортирование — консервация/демонтаж — восстановление природных систем».

Как следует из общей структуры и принципов геодинамического мониторинга, натурные (полевые) измерения и наблюдения являются базовыми и составляют весьма существенную и важную часть общих работ. Поэтому в данной статье особое внимание уделено применению геодезических и геофизических методов, а также георадарных спутниковых поверхностных съемок и подповерхностного зондирования.

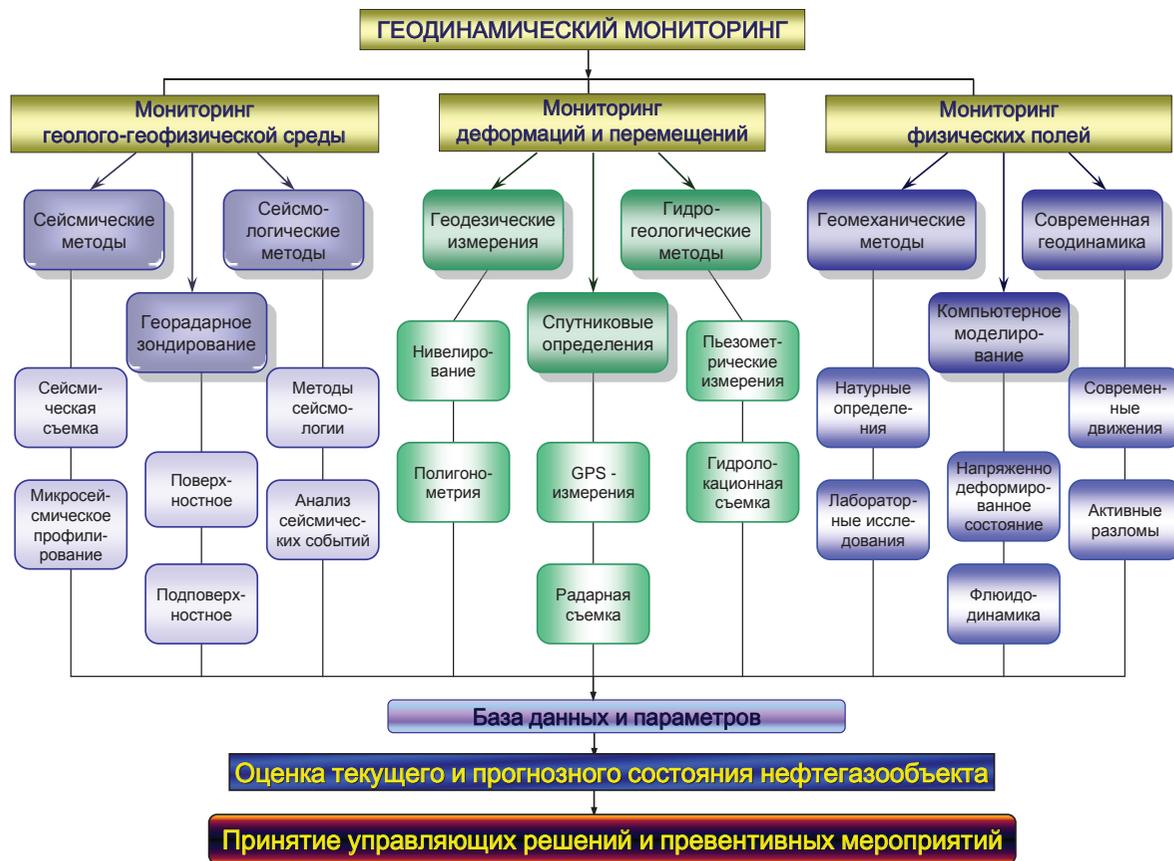


Рис. 3. Системная структура многоуровневого геодинимического мониторинга горнодобывающих и нефтегазовых природно-технических систем западной части российского сектора Арктики

Геодезические методы

В Горном институте КНЦ РАН накоплен большой опыт применения геодезических методов для измерения перемещений и деформаций массива пород при разработке рудных месторождений полезных ископаемых. Этот опыт может быть использован и для оценки состояния нефтегазовых объектов с учетом их специфики.

В первую очередь специфика магистральных трубопроводов заключается в их большой линейной протяженности. При этом трубопроводы неизбежно пересекают многочисленные структурные и геологические нарушения различной степени активности, а также контакты разнородных толщ пород с отличающимися деформационно-прочностными характеристиками и различным естественным напряженным состоянием.

По-видимому, и для таких объектов измерения перемещений и деформаций могут выполняться на специальных полигонах, представляющих собой сеть фундаментальных и рабочих реперов, закладываемых на отдельных (проблемных) участках трасс: в местах пересечения трассами трубопроводов зон крупных разломов, геодинимически активных контактов отдельных структурных блоков, зон

активного воздействия техногенных нагрузок от разработки близлежащих месторождений полезных ископаемых, крупных водных объектов и др.

Периодически определяя координаты пунктов и реперов и анализируя их изменения во времени, можно получить представление о характеристиках деформируемости массива пород и состоянии связанных с ним сооружений.

Наблюдательные сети должны представлять собой вытянутые цепочки триангуляции, полигометрические и нивелирные полигоны, по пунктам которых необходимо выполнять высокоточные угловые и линейные наблюдения по методикам, соответствующим по точности наблюдениям государственных геодезических сетей.

В настоящее время весьма перспективно применение и методов космической геодезии, в частности с использованием искусственных спутников систем GPS и ГЛОНАСС. Главные преимущества этих методов:

- Фактически координаты наблюдаемых пунктов (а следовательно, и смещения) определяются относительно спутников, заведомо располагающихся вне зоны влияния каких-либо техногенных воздействий. При всех других методах наблюдений выбор

местоположения исходных пунктов является чрезвычайно сложной и ответственной задачей, а во многих случаях практически малоразрешимой.

- Все три координаты наблюдаемых пунктов определяются одновременно (правда, с различной точностью) при существенном сокращении трудоемкости проведения наблюдений.

Точность методов космической геодезии уже практически соответствует требуемой точности определения перемещений и приближается к величинам ± 3 мм.

Методы космической геодезии обладают существенно большими возможностями исследования закономерностей деформирования массивов горных пород, поскольку позволяют определять частотные характеристики колебаний массива и по ним оценивать степень его приближения к критическому состоянию, т. е. к потере сплошности. В отношении трубопроводов эта очень важная информация имеет принципиальное значение, поскольку открывается путь к прогнозу состояния самого сооружения [14; 21; 23].

В случае применения геодезических методов в иерархично-блочных массивах одним из основных вопросов является определение необходимого числа пунктов наблюдательных сетей и их расположение относительно границ структурных блоков, напряженно-деформированное состояние которых необходимо контролировать. Здесь, как при решении любых геомеханических проблем, прежде всего необходимо выделить тип «эффективных структурных неоднородностей» и определить тем самым основные структурные блоки, слагающие контролируемую область.

Анализ показывает, что для определения взаимных перемещений, деформаций и энергетического состояния контролируемых блоков достаточно в каждом из них иметь по два пункта по обе стороны от границ или контактов. Таким образом, минимальное число пунктов на каждой грани блоков равняется четырем. При этом обеспечивается и достаточная надежность определения искомым параметров, так как фундаментальные пункты по разные стороны от границ блоков образуют жесткую геодезическую фигуру — четырехугольник (с четырьмя вложенными треугольниками) с возможностью вычислять координаты его вершин, используя различные сочетания наблюдаемых пунктов [13]. Фундаментальные пункты должны закладываться в массиве пород около трассы трубопровода и представлять собой бетонные конструкции, жестко связанные с массивом пород и обеспечивающие проведение всех указанных наблюдений в течение практически всего времени эксплуатации трубопровода.

Геофизические методы

Геодезические методы определения перемещений и деформаций весьма целесообразно дополнять геофизическими методами, которые позволяют

оценивать степень изменения физических параметров массивов горных пород под воздействием естественных и техногенных факторов, устанавливать предельные уровни деформаций и сейсмичности массива и находить индикаторы критического состояния геологической среды на проблемных участках.

В принципе для целей мониторинга возможно применение различных геофизических методов — акустических, теплофизических, радиометрических, электромагнитных. Однако среди всех методов по степени разработанности и уровню информативности заметно выделяются сейсмоакустические и электромагнитные методы.

Одной из основных схем сейсмоакустического контроля является профилирование на земной поверхности. Применительно к этой схеме в Горном институте КНЦ РАН разработана и широко применяется методика структурной пространственно-временной томографии скального массива на горнорудных предприятиях [1], которая может быть применена и при организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов.

Электромагнитные методы реализуются Горным институтом КНЦ РАН посредством георадиолокационных определений с использованием промышленных георадарных комплексов «Ramac GPR/X3M» (Швеция) и «Лоза» (Россия) [7]. Особую ценность при этом составляет возможность получения первичной инженерно-геологической информации, которая впоследствии при строительстве и эксплуатации объекта будет использоваться как базовая.

На рис. 4 в качестве примеров приведены разрезы подповерхностных структур, полученные методом георадарных исследований.

Интегрирование георадарных съемок в систему геодинамического мониторинга

Георадарные поверхностные съемки и подповерхностные зондирования выполнены Горным институтом КНЦ РАН практически на всех крупных горнодобывающих предприятиях Мурманской области. На карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» измерения выполнены для оценки состояния и исследования внутренней структуры массива пород рабочих уступов, а также для выявления и геометризации пространственного положения плоскостей тектонических нарушений, геологических дислокаций и зон неоднородностей и структурной нарушенности [8; 10]. В течение ряда лет выполнялся мониторинг состояния ограждающих дамб хвостохранилища в целях минимизации рисков фильтрационно-деформационных процессов [2]. На АО «Апатит» выполнена оценка внутренней структуры породных отвалов карьера «Центральный» в целях выявления уплотненных породно-снежно-ледяных зон (линз), а перспективный участок рудника «Восточный» дифференцирован по литологической разности пород и руд. При строительстве ограждающих дамб

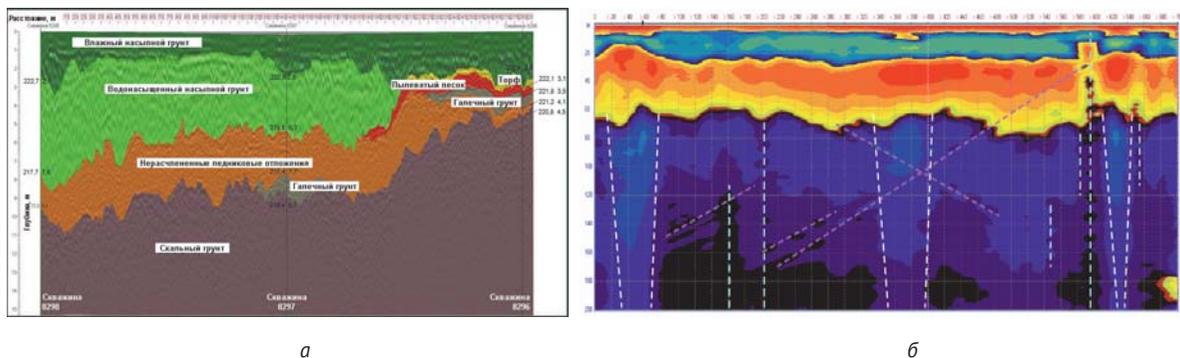


Рис. 4. Разрезы геологической среды, построенные по данным георадарного подповерхностного зондирования: моренные отложения (а), скальный техногенно-нарушенный массив (б)

хвостохранилища горно-обогатительного комбината «Олений ручей» ЗАО «Северо-западная фосфорная компания» была выполнена оценка качества «выторфовки» грунтов площадки под строительство и исследовано подстилающее основание на наличие скрытых влагонасыщенных и водоносных слоев. В дальнейшем был выполнен мониторинг вывода гидротехнической системы «хвостохранилище — дамбы» на рабочий режим.

Кроме того, на острове Шпицберген (АО «Арктикуголь») подповерхностным зондированием уточнена глубина залегания мерзлых пород. Георадарное подповерхностное зондирование выполнено также на ряде плотин ГЭС Кольского региона.

В целом за 2009—2014 гг. георадарные исследования для решения различных горно-геологических и геотехнических задач были выполнены более чем на 20 объектах, среди которых помимо перечисленных выше фундаменты телебашни Мурманска, котлованы и площадки для строительства, лыжный и городской стадионы, дороги и др. (рис. 5).

Полученные результаты позволяют уверенно констатировать, что георадарные технологии, обладающие такими качествами, как оперативность и информативность, могут быть эффективным инструментом при решении текущих задач геодинамического мониторинга отдельных участков и/или сооружений.

Для мониторинга площадных смещений объектов действующих горнорудных и перспективных нефтегазовых предприятий целесообразно использовать архивные и оперативные спутниковые радарные данные с их интерферометрической обработкой. Возможно использование снимков как с российской спутников «Ресурс-М» и «Метеор-П», так и с европейских. В частности, Европейское космическое агентство предоставляет свободный доступ к радарным данным спутника «Sentinel-1A/B», которой проводит постоянную съемку, в том числе Кольского полуострова, в режиме Interferometric Wide Swath. Спутниковые данные могут быть также получены от национальных космических агентств ALOS (Япония), «TerraSAR-X» (Германия) и др.

Система многоуровневого геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов

западной части российского сектора Арктики создается Горным институтом КНЦ РАН в содружестве с Северным (Арктическим) федеральным университетом (САФУ) им. М. В. Ломоносова и Балтийским федеральным университетом (БФУ) им. И. Канта в рамках договоров о сотрудничестве. В САФУ накоплен архив радарных данных «Radarsat-1/2» на арктическое побережье России и имеется наземная станция «УниСкан-36» для оперативного приема информации со спутников. БФУ имеет также большой банк архивных снимков и располагает методами обработки и интерпретации радарных снимков для целей геодинамического мониторинга.

Сопоставительный анализ оперативных и архивных спутниковых радарных съемок позволит контролировать всю площадь горного отвода и прилегающих природных систем одновременно. Многовременные радарные данные могут использоваться для обновления цифровых моделей земной поверхности и определения ее смещений и смещений техногенных объектов. В целях получения достаточно точной для практических целей оценки смещений техногенных объектов для обработки спутниковых радарных снимков будет применяться метод интерферометрии.

Верификация плановых и высотных смещений, полученных по радарным данным, будет проводиться на основе синхронных геодезических измерений на имеющихся геодинамических полигонах и калибровки высокоточными геодезическими ГНСС (GPS/ГЛОНАСС) измерениями.

Таким образом, интегрирование спутниковых и поверхностных георадарных съемок и георадарного подповерхностного зондирования в систему геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики придает системе в целом многоуровневый характер (рис. 6).

Организация геодинамического мониторинга

Как уже отмечалось, земная кора западной части российского сектора Арктики весьма активна в геодинамическом отношении. Здесь расположены

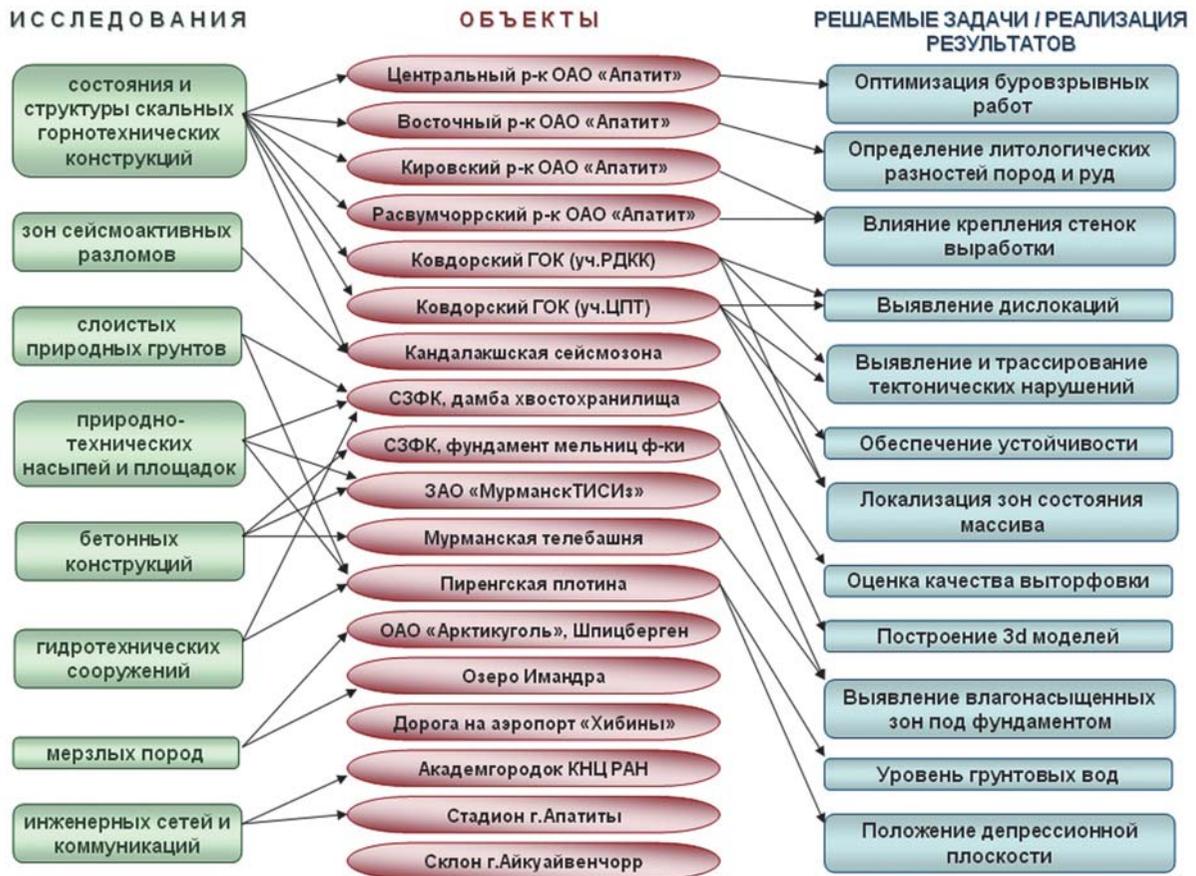


Рис. 5. Георадарные подповерхностные измерения западной части российского сектора Арктики

массивы, сложенные высокопрочными высокоупругими породами, состояние которых обусловлено действием гравитационно-тектонических полей напряжений. Вместе с тем массивы интенсивно расчленяются структурными неоднородностями различных рангов от крупных разломов до микротрещиноватости. Вследствие этого геодинамический мониторинг целесообразно организовать практически по всему региону, включая Кольский полуостров, шельф Баренцева и Печорского морей, с детализацией получаемой информации для районов горнодобывающей и нефтегазопромысловой деятельности.

Предлагаемые методологические подходы к созданию многоуровневой системы геодинамического мониторинга заключаются в комплексировании современных методов и средств для параметрической оценки откликов геолого-геофизической среды на техногенное воздействие, измерения поверхностных и внутренних смещений и деформаций сооружений и рельефа, а также выявления особенностей трансформации природно-техногенных физических полей. Наряду с уже ставшими традиционными сейсмическими и сейсмологическими методами для мониторинга геологической среды предлагается использовать подповерхностную и поверхностную георадарную съемку, достаточно хорошо зарекомендовавшую себя при мониторинге горнотехнических систем [7], а также спутниковую радарную съемку [14].

Интегрирование результатов георадарных определений в маркшейдерско-геодезическую систему позволит достаточно уверенно и с высокой точностью определять смещения и деформации дневной поверхности и контролируемых объектов. Дополнительное использование данных гидрогеологических наблюдений в комплексе с методами геомеханики, современной геодинамики и компьютерным моделированием позволит получать более полную картину результирующих смещений с учетом глубинных процессов.

Основные подсистемы геодинамического мониторинга должны входить составной частью в общую проектную документацию и разворачиваться в ходе строительных работ. Основу систем наблюдений должны составлять геодезические наземные и спутниковые измерения плановых и высотных координат пунктов геодинамических полигонов, а также площадная поверхностная и спутниковая георадарная съемка. Наземные геодезические методы наблюдений целесообразно по мере необходимости дополнять геофизическими методами. Вместе с тем проектируемая система мониторинга должна быть открыта для возможности применения вновь разработанных перспективных методов контроля состояния окружающей среды.

В структуре предприятий, осуществляющих добычу рудного и углеводородного сырья, его переработку,

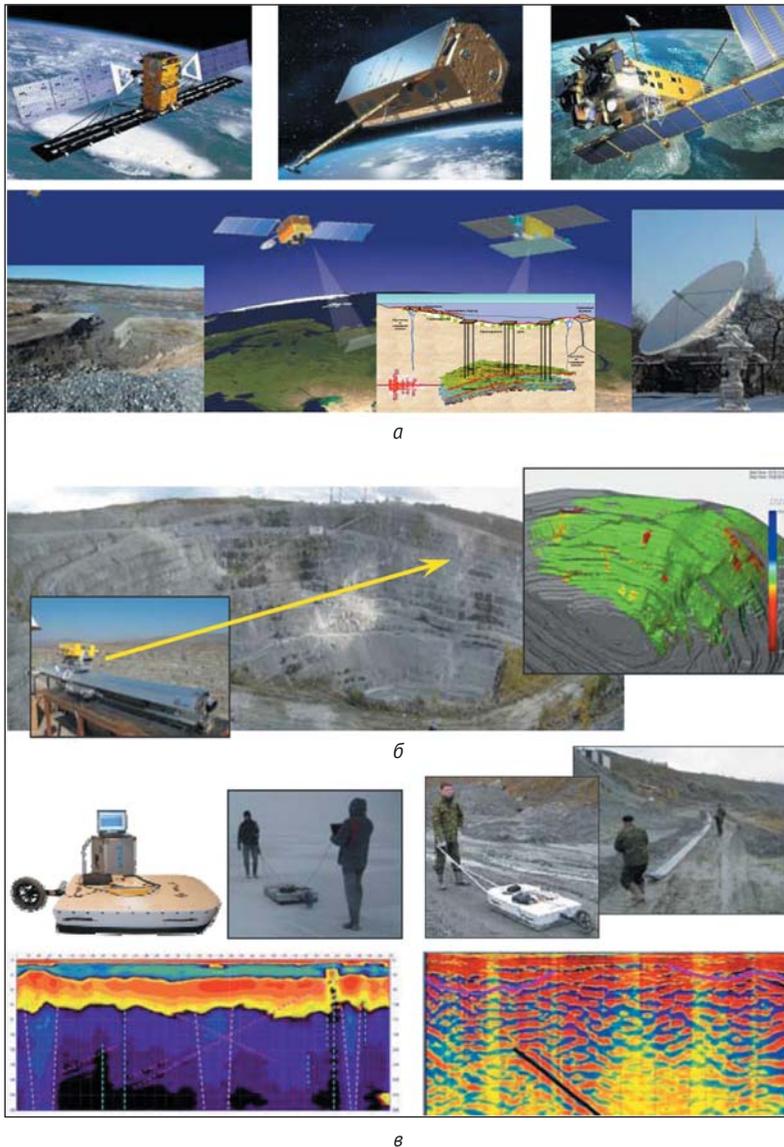


Рис. 6. Применение георадарных технологий для целей геодинамического мониторинга на различных уровнях: спутниковом (а), поверхностном (б), подповерхностном (в)

хранение, транспортировку, складирование горнопромышленных и нефтегазопромысловых отходов, должно быть создано специальное подразделение для мониторинговых наблюдений и обработки получаемых результатов. У него должны быть установлены постоянные контакты и налажен обмен информацией с другими подразделениями, непосредственно выполняющими работы, имеющие отношение к вопросам изменения геодинамического состояния геологической среды и в первую очередь массива горных пород. Полный анализ всей информации, полученной из многоуровневой системы геодинамического мониторинга и с участием активного ведения работ, позволит правильно и в целом оценивать состояние сооружения, прогнозировать возможные отклонения от нормальной работы, вовремя принимать необходимые меры и тем самым обеспечивать его безопасную и эффективную эксплуатацию.

Методическую и консультативную помощь таким подразделениям будет оказывать Горный институт КНЦ РАН, имеющий большой опыт ведения геодинамического мониторинга на горнорудных предприятиях Кольского полуострова и являющийся головным институтом по

вопросам горного дела по программе Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

Заключение

Применительно к особо ответственным горнотехническим и нефтегазовым объектам западной части российского сектора Арктики обосновано создание системы многоуровневого геодинамического мониторинга геологической среды, в основу которой положен принцип проведения системных мультидисциплинарных комплексных исследований, включающих наземные и GPS (спутниковые) геодезические, инженерно-геологические, гидрогеологические и геотехнические измерения, а также подповерхностную, поверхностную и площадную (спутниковую) георадарную съемку. Интегрирование георадарных съемок в геодезическую систему наблюдений позволит достаточно уверенно и с высокой точностью определять смещения и деформации дневной поверхности и контролируемых объектов. Совместное использование геодезических и георадарных методов в комплексе с инженерно-геологическими, гидрогеологическими и геомеханическими исследованиями позволит получать более полную картину состояния геологической среды, сопряженной с контролируемыми объектами, с учетом тектонических и флюидодинамических процессов. Проведение геомониторинга в составе таких системных мультидисциплинарных комплексных исследований позволит выявлять опасные геомеханические процессы и геодинамические проявления на ранних стадиях их формирования в геологической среде, своевременно реагировать и принимать управленческое решение по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации. Обоснованы принципы организации системы многоуровневого геодинамического мониторинга на горнодобывающем (нефтегазопромысловом) предприятии.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект 05-15-06831.

Литература

1. *Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А.* Геофизический мониторинг при строительстве и эксплуатации объектов горнопромышленного комплекса и гидроэнергетики. — Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2010. — 177 с.
2. *Данилкин А. А., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Максимов Д. А.* Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // ГИАБ. — 2014. — № 7. — С. 344—352.
3. *Дмитриевский А. Н., Кульпин Л. Г., Максимов В. М.* Проблемы освоения природно-техногенных объектов морской добычи углеводородов в Арктике // Мурманшельфинфо. — 2009. — № 1 (6). — С. 11—16.
4. Геодинамическая безопасность при освоении недр земной поверхности. — Апатиты: КНЦ РАН, 2003. — 207 с.
5. *Годзиловская А. А., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А.* Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке / Отв. ред. А. Н. Виноградов. — М.: Ваш полиграф. партнер, 2010. — 130 с.
6. *Калашник А. И.* Горно-металлургическая деятельность на Кольском полуострове // Управление качеством окружающей среды на Кольском полуострове: информ. журн. — 2006. — Вып. 1. — С. 13—20.
7. *Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Демахин А. Ю.* Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова // Вестн. МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. ун-та. — 2009. — Т. 12, № 4. — С. 576—583.
8. *Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю. и др.* Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа // Гор. журн. — 2014. — № 4. — С. 60—64.
9. *Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А.* Гидротехнические сооружения Мурманской области: геоэкологические проблемы и инновационные исследования. — Ч. 1 // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли — формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, 13—15 окт. 2014 г. — Апатиты; СПб., 2014. — С. 391—399.
10. *Калашник А. И., Казачков С. В., Сохарев В. А. и др.* Выявление дислокаций в скальных горнотехнических конструкциях // Вестн. МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. ун-та. — 2013. — Т. 16, № 1. — С. 93—97.
11. *Калашник А. И., Максимов Д. А.* Автоматизация геостатистической обработки данных при проведении факторного анализа трасс линейно-протяженных объектов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной пром-сти. — 2013. — № 8. — С. 19—21.
12. *Касьянова Н. А.* Экологические риски и геодинамика. — М.: Науч. мир, 2003. — 332 с.
13. *Козырев А. А., Калашник А. И., Каспарьян Э. В., Савченко С. Н.* Концепция организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов западного сектора Российской Арктики // Вестн. МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. ун-та. — 2011. — Т. 14, № 3. — С. 587—600.
14. *Кутинов Ю. Г., Боголицын К. Г., Чистова З. Б.* Исследования северных территорий Земли из космоса: проблемы, свойства, состояние, возможности на примере МКС «Арктика»: В 3 т. — Т. 1. — Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. — 390 с.
15. *Мельников Н. Н., Калашник А. А., Калашник Н. А., Каспарьян Э. В.* Научно-организационные основы геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов в регионе Баренцева моря в целях защиты окружающей природно-технической среды // Защита окружающей среды в нефтегаз. комплексе. — 2014. — № 6. — С. 5—10.
16. *Мельников Н. Н., Калашник А. И., Каспарьян Э. В., Калашник Н. А.* Концепция геодинамического мониторинга объектов нефтегазопромысла в регионе Баренцева моря // Геоэкология. — 2015. — № 2. — С. 166—175.
17. *Мельников Н. Н., Калашник А. И.* Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. — 140 с.
18. *Мельников Н. Н., Калашник А. И.* Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность // Газ. пром-сть. — 2011. — Спецвып. 661. — С. 46—53.
19. *Мельников Н. Н., Скороходов В. Ф., Месяц С. П.* Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли // Гор. журн. — 2013. — № 12. — С. 109—116.
20. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Мори и Д. Фурментро. — М.: Мир, 1994. — 416 с.
21. *Панжин А. А.* Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии // Маркшейдерия и недропользование. — 2003. — № 2. — С. 43—54.
22. *Серебрякова Л. И.* Тектоника, сейсмичность и скорости современных вертикальных движений земной коры на северо-западе Восточно-Европейской платформы // Геодезия и картография. — 2013. — № 3. — С. 47—57.
23. *Филатов А. В., Савеленко В. В., Брыксин В. М., Евтюшкин А. В.* Высокоточная оценка смещений техногенных объектов на базе метода Stamps на кластере по данным Palsar и Terrasar-x // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов. — М.: Ин-т космич. исследований РАН, 2012. — 364 с.