

УДК 622

Принципы организации геомеханического мониторинга линейно-протяжённых объектов (применительно к нефте- и газопроводам)

А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, С.Н. Савченко

Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. В статье приводится обоснование необходимости организации постоянного геомеханического мониторинга геологической иерархично-блочной среды. При строительстве линейно-протяжённых объектов неминуемо пересечение множества структурных неоднородностей, многие из которых весьма подвижны, что может вызвать осложнения в процессе эксплуатации таких объектов. Приведены основные положения геомеханического мониторинга среды на различных стадиях – строительстве, эксплуатации и консервации нефте-, газопроводов; обсуждаются вопросы организации измерительных полигонов, приёмы математической обработки результатов измерений и их интерпретации. На примерах показана возможность применения разработанной методики.

Abstract. The paper deals with justification of necessity to organize continuous geomechanical monitoring of geological hierarchical-block environment. While constructing linearly extended facilities, it is unavoidable to cross a large number of structure heterogeneities, many of them are quite movable that result in challenges during operation of these facilities. There have been considered the basics of geomechanical monitoring of the environment at different stages as constructing, operation and conservation of oil and gas pipelines; the issues of testing grounds arrangements, methods of mathematical processing of measurements results and its interpretation have been discussed. The examples show possibility of developed methodology application.

Ключевые слова: магистральные нефте- и газотрубопроводы, геомеханический мониторинг
Keywords: main oil and gas pipelines, geomechanical monitoring

1. Введение

Геомеханический мониторинг состояния линейно-протяжённых объектов имеет характерные особенности, связанные с неизбежным пересечением различных структурных неоднородностей массивов горных пород типа разломов, контактных зон, зон трещиноватости и пр. При этом весьма вероятны подвижки массива пород под воздействием как естественных, так и техногенных причин.

Типичным представителем объектов подобного типа являются магистральные трубопроводы – весьма ответственные сооружения, высокий уровень безопасной эксплуатации которых должен поддерживаться в течение весьма долгого периода времени.

В настоящее время постепенно накапливается опыт строительства и эксплуатации подобных сооружений. В частности, недавно были опубликованы весьма интересные данные о строительстве сахалинских трубопроводов по проекту "Сахалин-2" (Комаров и др., 2008). Указывалось, что трассы трубопроводов пересекают 19 критических участков – сейсмических разломов. Строительство переходов через эти участки было выделено в отдельный проект, по каждому из разломов проведены специальные изыскания, а полученные данные с целью построения специальных моделей обрабатывались в специализированном проектном институте (Snamporgetti, Italy). На основе построенных моделей были составлены рекомендации по уточнению предварительных проектных решений (перетрассировки, изменения углов пересечения трубопроводом разломов, точки расположения крановых участков и пр.). Прокладке трубопроводов через разломы предшествовали подготовки траншей особо широкого профиля с укладкой компрессионных компенсаторов для пластичного реагирования на возможные сдвиги грунта и пород по плоскостям разломов. Кроме того, место пересечения трубопроводом разлома герметично запаивалось в геомембрану для предотвращения заполнения траншеи водой, которая в случае замерзания может уменьшить или вовсе исключить необходимую подвижность трубы относительно деформирующегося грунта. Также на разломах применялись трубы с более высокими, чем на остальных участках, прочностными характеристиками, более толстой стенкой и с более тщательным режимом испытаний на раскрытие усталостных трещин и контроля различными методами, включая рентгенографический. Были тщательно продуманы системы защиты трубопроводов от нарушений его целостности, по всей трассе предусмотрено сооружение специальных крановых узлов, которые в случае необходимости в автоматическом режиме могут отсекают каждый сейсмический разлом, минимизируя последствия гидравлических ударов или других негативных явлений в трубопроводах.

С рассматриваемых позиций не являются исключением и все варианты трассы газопровода "Видяево-Волхов", которые проходят по геодинамически активным районам Кольского полуострова вблизи крупных природно-технических систем, таких как Туломская ГЭС, мощные горнопромышленные комплексы – Оленегорский горно-обогатительный комбинат, апатитовые рудники ОАО "Апатит" и др. Для этих участков характерна весьма сложная геодинамическая ситуация, обусловленная высоким уровнем естественных полей напряжений, современными движениями блоков земной коры и весьма крупными масштабами горных работ, оказывающими существенное влияние на геодинамический режим вмещающей их геологической среды, выражающееся в увеличении деформаций пород и повышенной сейсмичности в прилегающих районах (Козырев и др., 2002).

Исходя из этого, действенной мерой предотвращения аварийных ситуаций, вызванных упомянутыми геодинамическими причинами, в дополнение к специальным технологическим приёмам строительства трубопроводов на проблемных участках, является организация постоянного геодинамического мониторинга состояния массива, в первую очередь, в местах пересечения трассами трубопроводов зон крупных разломов, геодинамически активных контактов отдельных структурных блоков, зон активного воздействия техногенных нагрузок от разработки близлежащих месторождений полезных ископаемых, крупных водных объектов и др.

2. Концепция геодинамического мониторинга

Современная концепция мониторинга каких-либо явлений, в том числе и деформационных процессов в массиве горных пород, включает в себя следующие обязательные компоненты:

- первоочередную разработку математических или иных моделей контролируемых процессов;
- выбор и расчет приоритетных контролируемых параметров;
- измерение этих параметров в натуральных условиях;
- сопоставление расчетных и измеренных величин с целью внесения необходимой коррекции принятых моделей;
- оценку современного состояния контролируемого объекта путём сопоставления измеренных и прогнозно-критических значений наблюдаемых параметров;
- разработку технических мер по обеспечению эффективности и безопасности горных работ;
- контроль реализации разработанных технических мер и их корректировку.

Как видим, натурные измерения являются одной из необходимых, может быть даже основных частей, но отнюдь не исчерпывают собой весь мониторинг массива горных пород. Между тем до сих пор весьма распространены попытки свести мониторинг только к непрерывным натурным наблюдениям, чем существенно сужается арсенал методов решения этой проблемы и наносится определённый ущерб в виде затраты средств, времени и труда без надлежащего успеха.

Поскольку основной задачей любой системы мониторинга окружающей среды является получение объективной информации о состоянии контролируемых объектов, весьма существенным является вопрос о своевременности ее получения. С этой точки зрения основным принципом мониторинга должно явиться проведение постоянных наблюдений в течение всей "жизни" объекта, начиная с момента проведения изысканий и выбора площадки строительства и кончая демонтажом оборудования отработанного сооружения или его консервацией. При этом, очевидно, на различных этапах строительства объектов задачи и содержание работ по организации и проведению мониторинга будут различными.

В частности, для трубопроводов, в соответствии со стадиями и этапами их строительства и эксплуатации, выделяются следующие основные этапы мониторинга, каждый из которых имеет свои особенности:

1. мониторинг на стадии инженерных изысканий и выбора трассы;
2. мониторинг при строительстве трубопроводов;
3. мониторинг при эксплуатации трубопроводов;
4. мониторинг на стадии демонтажа оборудования или консервации объекта.

Основной задачей мониторинга на этапе инженерных изысканий является получение фоновых параметров геофизической среды для рассматриваемого региона, пункта, площадки строительства объекта, т.е. характеристик, присущих окружающей среде, и, в первую очередь, массиву вмещающих пород в его естественном состоянии, еще до возмущения процессами строительства и эксплуатации сооружений.

Полученные фоновые значения будут являться базовыми для оценки степени воздействия процессов строительства и эксплуатации контролируемых объектов на окружающую среду, а также степени опасности возникающей ситуации.

С этой целью должен быть выполнен анализ и обобщение результатов изучения фондовых и архивных материалов, инженерных изысканий по определению свойств пород и грунтов, структурных

особенностей и естественного напряженного состояния массива, а также организованы специальные долговременные наблюдения за проявлениями сверхмедленных тектонических процессов с закладкой и оборудованием соответствующих полигонов и пунктов наблюдений. На основании полученных результатов начинают формироваться специализированные базы данных, пополняемые в дальнейшем по мере проведения последующих этапов мониторинга.

На этапе строительства сооружений основными задачами мониторинга являются оценка степени воздействия процессов строительства на окружающую среду с целью обеспечения безопасности и обоснования оптимальных технологий работ.

На данной стадии работы по организации мониторинга должны включать:

- 1) физическое и математическое моделирование сооружений;
- 2) натурные измерения напряжений или деформаций в массиве, а также в наиболее ответственных конструктивных элементах сооружений;
- 3) закладка полигонов для контроля неотектонических процессов, состояния структурных блоков, в которых размещается объект.

Фактически на этой стадии должно быть завершено формирование всех основных систем мониторинга с прокладкой коммуникационных линий, оборудованием центра сбора и обработки информации, установкой и сдачей в эксплуатацию вычислительной техники.

Мониторинг на этапе эксплуатации трубопроводов должен обеспечить контроль за состоянием системы "сооружение – среда" и отслеживание процессов, происходящих в ней. При этом он должен быть встроен в общие системы контроля технологических процессов и безопасности сооружений.

На этапе консервации основными задачами мониторинга являются контроль направления и скорости возвращения параметров внешней среды после прекращения эксплуатации сооружений к её первоначальному состоянию.

Необходимо различать три режима эксплуатации трубопроводов:

- а) режим нормальной эксплуатации;
- б) режим аварийных ситуаций, включая максимально возможную аварию;
- в) режим консервации или вывода из эксплуатации объектов.

При нормальной эксплуатации рассматриваемых сооружений все системы мониторинга должны работать в основном режиме, определяемом главной (штатной) программой, где отражены периодичность опроса датчиков и проведения натурных измерений и наблюдений, порядок обработки первичной информации и её свертывания, периодичность передачи свернутой информации в вышестоящие инстанции.

При аварийных ситуациях системы мониторинга работают по специальным программам в зависимости от класса аварий, с задействованием резервных систем измерений и выдачей оперативных данных, например, о степени загрязнения окружающей среды.

При консервации сооружений системы мониторинга также должны работать по измененным (по отношению к штатной) программам, учитывающим специфику выполняемых работ и их влияние на окружающую среду.

3. Организация измерительных полигонов

Схемы организации измерительных полигонов и проведения постоянных наблюдений определяются конкретными условиями и могут быть различными как с точки зрения геометрии расположения наблюдательных пунктов, так и методов проведения наблюдений и обработки результатов.

Одна из возможных систем наблюдений представлена на рис. 1. В её основу положена закладка и оборудование на каждом проблемном участке трассы трубопровода специального геодинамического полигона, имеющего форму геодезического четырёхугольника и состоящего минимально из 4-х пунктов, пространственное положение которых регулярно определяется методами космической (GPS) и традиционной геодезии (высокоточным нивелированием по программе I-II классов и светодальномерными измерениями).

Полигоны могут быть и вытянутых форм в виде цепочек пунктов или цепочек треугольников, располагаемых вдоль трассы трубопровода.

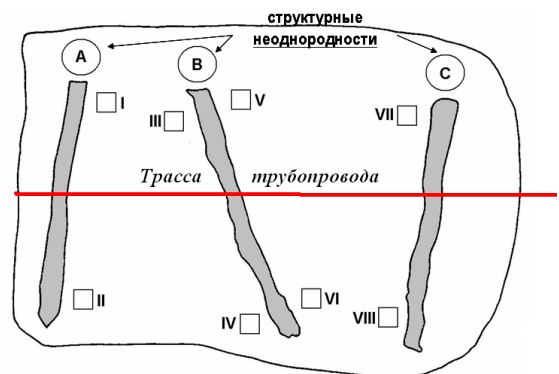


Рис. 1. Схема геодинамического полигона для контроля состояния трубопровода при пересечении им структурной неоднородности I-VIII – фундаментальные пункты

Фундаментальные (долговременные) пункты полигонов представляют собой бетонные конструкции, жёстко связанные с массивом пород, обеспечивающие проведение всех указанных наблюдений в течение практически всего времени эксплуатации трубопровода. Наряду с этим могут закладываться и временные пункты, рассчитанные на какой-либо определённый ограниченный срок существования.

Кроме того, для более детальной оценки влияния естественных и техногенных факторов на состояние геологической среды на проблемных участках комплекс геодезических измерений может быть дополнен геофизическими измерениями, например, сейсмологическими наблюдениями, методом сейсмической томографии и др.

Периодичность наблюдений, их конкретные программы, методы обработки результатов определяются конкретными условиями и целями организации мониторинга. При этом геодезические наблюдения выполняются по известным классическим методикам, поэтому здесь на них останавливаться не будем.

4. Математическая обработка результатов наблюдений

Представляет интерес обработка результатов геодезических наблюдений, поскольку в последнее время удаётся с помощью привлечения элементов тензорного исчисления получить более детальную информацию о геомеханическом состоянии контролируемых участков массива (Savchenko, Kasparyan, 2007).

В частности, если предположить, что перемещения любых точек какого-либо блока u_i, v_i, w_i (i – номер точки, пункта наблюдения) являются линейно-упругими и определяются как разности соответствующих координат пунктов в различные периоды времени, то в общем виде u_i, v_i, w_i можно представить следующей аналитической зависимостью:

$$\begin{aligned} u_i &= a_{11}x_i + a_{12}y_i + a_{13}z_i + a_{14}, \\ v_i &= a_{21}x_i + a_{22}y_i + a_{23}z_i + a_{24}, \\ w_i &= a_{31}x_i + a_{32}y_i + a_{33}z_i + a_{34}. \end{aligned} \quad (1)$$

Каждое из этих выражений представляет собой систему из 4-х линейных уравнений, содержащую в качестве неизвестных 4 коэффициента a_{ij} при соответствующих известных координатах x, y и z и известных перемещениях u_i, v_i, w_i .

Вычислив значения этих коэффициентов, переходим к тензору производных от перемещений в блоке, симметричная часть которого ϵ есть ни что иное, как тензор собственно деформаций блока, а антисимметричная A указывает на вращение блока как единого целого.

Таким способом мы определяем фактически дополнительные (относительно условно недеформированного состояния) средние деформации блока. Используя обобщенный закон Гука, по найденным дополнительным деформациям находим дополнительные напряжения блока, обусловленные природными и техногенными факторами.

5. Примеры использования методики обработки наблюдений

Возможности разработанной методики обработки наблюдений продемонстрируем на конкретных примерах.

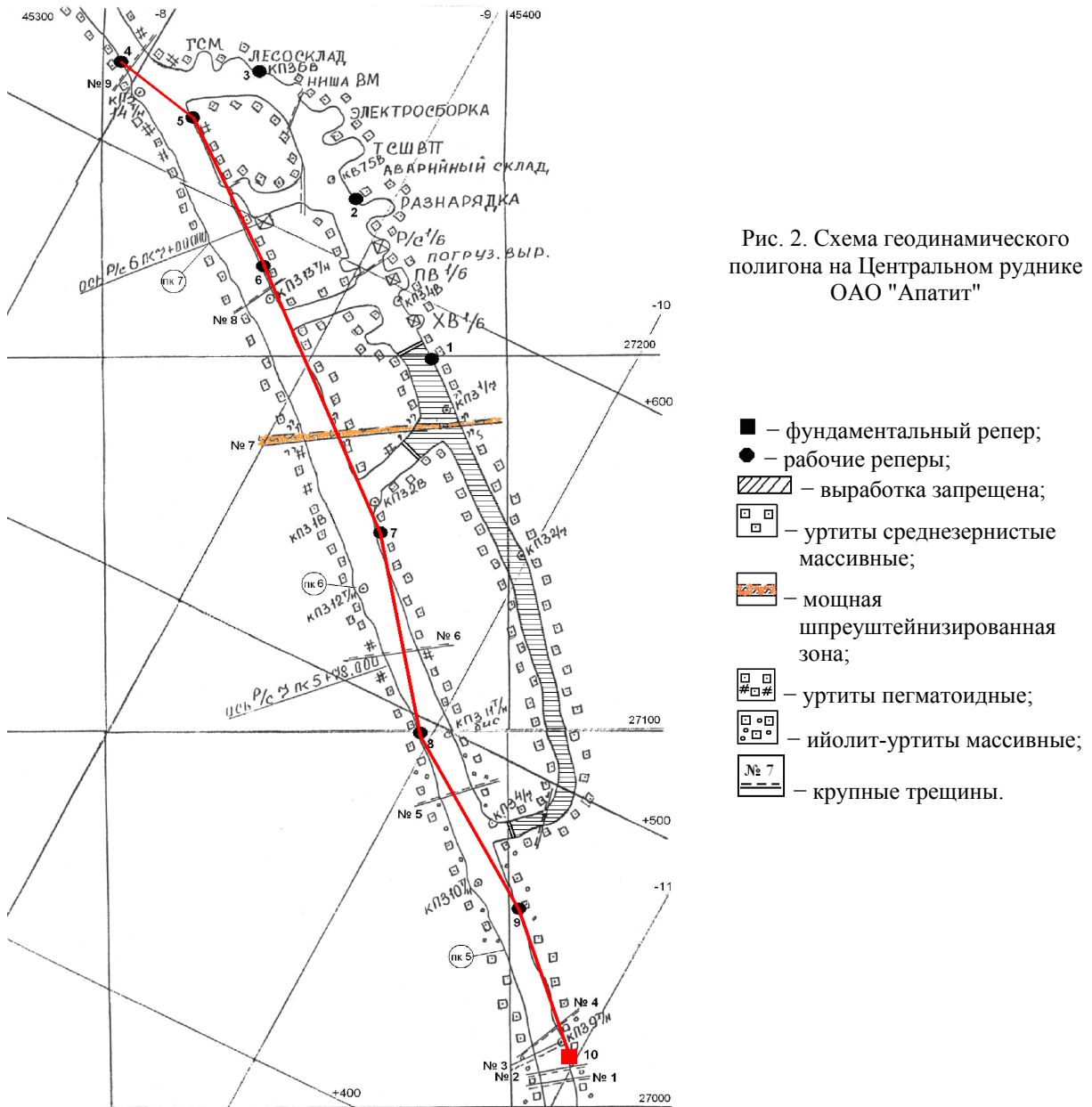
1. На рис. 2 представлена схема расположения наблюдательных пунктов природно-технической системы "Хибины", на которых в период с 2001 по 2005 гг. были выполнены GPS-измерения с целью определения степени изменения напряжённо-деформированного состояния структурных блоков, слагающих массив пород. При этом необходимо отметить, что наблюдательные пункты "Смотровая" и "Р-1" располагаются в зоне влияния горных работ.

В качестве исходного положения приняты результаты определения координат наблюдаемых пунктов в 2001 г. Тогда тензоры дополнительных деформаций и напряжений получаются из разностей координат 2002, 2003, 2004, 2005 гг. и 2001 г.

Тензоры дополнительных деформаций ($\epsilon_1 - \epsilon_2$)·10⁴ и тензоры дополнительных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_4$) (МПа) для каждого из указанных моментов времени определялись в предположении, что модуль Юнга $E = 1 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$.

Далее, переходя к рассмотрению главных напряжений, получаем величины изменений главных напряжений в рассматриваемые периоды:

	2001-2002 гг.	2001-2003 гг.	2001-2004 гг.	2001-2005 гг.
σ_1	-2.16 МПа	-2.64 МПа	-2.55 МПа	-1.69 МПа
σ_2	-2.25 МПа	-2.87 МПа	-2.72 МПа	-1.74 МПа
σ_3	-6.01 МПа	-8.04 МПа	-7.16 МПа	-5.19 МПа



Анализ этих результатов свидетельствует о том, что массив горных пород испытывает сжимающие дополнительные напряжения и деформации, причём в течение всего контролируемого периода. При этом изменения напряжений весьма небольшие по величине, что свидетельствует о достаточно стабильном состоянии контролируемой территории.

2. Если наблюдательные пункты геодинамического мониторинга представляют собой вытянутые полигоны, и наибольший интерес представляют перемещения вдоль трассы трубопровода, то обработка результатов по изложенной методике упрощается.

На рис. 2 представлена схема геодинамического полигона, который был заложен в 2006 г. в транспортном тоннеле Центрального рудника (ОАО "Апатит") для контроля геодинамической ситуации, в частности, измерения смещений крупных структурных блоков для прогноза возможных сильных сейсмических событий и динамических проявлений горного давления.

За период времени, прошедший с момента закладки, выполнено пять циклов светодальномерных и нивелирных измерений, включая базисный.

При обработке результатов условно предполагалось, что пункты полигона и их перемещения находятся в одной вертикальной плоскости, тогда число уравнений в системах и число неизвестных сокращается.

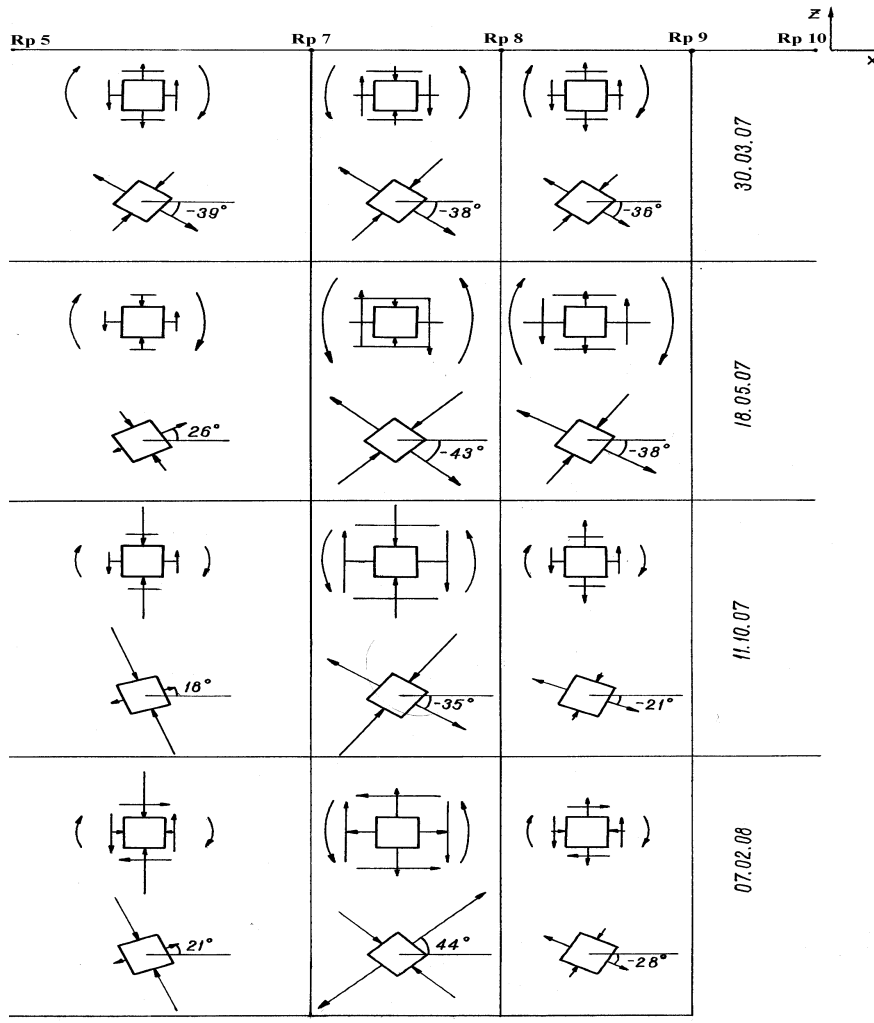


Рис. 3. Деформации элементарного объема в осях XOZ, вращение блоков и деформации в главных осях

В этом случае для определения деформаций массива горных пород между соседними реперами i -м и k -м в каждый момент времени t_j необходимо решить две системы линейных уравнений относительно четырёх неизвестных $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$.

По найденным величинам $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ определяются тензоры деформаций и жесткого вращения, а также главные деформации.

На рис. 3 приведены результаты расчётов компонент тензоров деформаций и компонент тензора вращения для отдельных участков полигона в различные моменты времени.

Анализ результатов расчётов показывает, что участки полигона между реперами 9-8, 8-7 и 7-5 деформируются и испытывают вращения различным образом, при этом сопоставление компонент тензоров деформаций и вращения в отдельные моменты времени (даты наблюдений) позволяют последовательно проследить изменения состояния указанных участков контролируемого массива в течение всего периода наблюдений от цикла к циклу.

В частности, участок между реперами 9-8 испытывает в течение всего периода наблюдений сжатие в направлении оси OX, растяжение по оси OZ, а касательные деформации положительны, т.е. элементарный объем массива скашивается в первый квадрант. В главных осях максимальная компонента является растягивающей и наклонена к горизонту под углом $\alpha = -36^\circ$, минимальная компонента – сжимающая. Жесткий поворот данного участка массива осуществляется по часовой стрелке. При этом величины деформаций возросли, а затем стали уменьшаться. То же самое наблюдается и для компоненты жесткого вращения.

Несколько иначе развивается процесс деформирования на участке между реперами 8-7. Здесь во всех циклах наблюдений все компоненты тензора деформаций имеют противоположные направления по сравнению с предыдущим участком, касательные деформации скашивают элементарный объем также в

противоположную сторону, ко второму квадранту. В то же время до 07.02.08 (до последнего, 4-го цикла) соотношения между главными деформациями наблюдаются такие же, как и для участка 9-8. В последнем цикле измерений ситуация резко изменяется – главные деформации меняют знак, и угол наклона изменяется с отрицательного на положительный. Жёсткое вращение происходит в противоположном направлении при максимальной величине, соответствующей наблюдениям 16.05.07 (2-му циклу).

Участок между реперами 7-5 в направлении оси ОХ имеет знакопеременные деформации, но их абсолютная величина находится в пределах 10^{-5} - 10^{-6} , т.е. практически на 1-2 порядка ниже, чем деформации в направлении оси ОZ, которые во всё время наблюдений остаются сжимающими, за исключением первого цикла измерений. Касательные деформации, как и в первом случае, скашивают элементарный объём в первый квадрант. Так же как и между реперами 9-8, жесткое вращение происходит по часовой стрелке, в отличие от предыдущего участка 8-7. Иначе говоря, участки массивов между реперами P8-P7 и P7-P5 вращаются "навстречу друг другу" и причём с существенно различными характеристиками.

Всё изложенное позволяет заключить, что наиболее нестабильное состояние наблюдается для участка 8-7. Можно предположить, что в дополнение к известному структурному нарушению между реперами 7-5 (трещина № 7), начинает проявляться ещё структурная неоднородность и между реперами 8-7. При этом, судя по относительным вертикальным перемещениям этих участков, участок 8-7 как бы "подныривает" под участок 7-5.

Проведенные расчеты показывают сложный характер техногенного деформирования блочной геологической среды и являются дополнительным аргументом в пользу необходимости продолжения геодинамического мониторинга.

6. Вывод

Для ответственных сооружений типа трубопроводов необходимо организовывать постоянный геодинамический мониторинг массива, в первую очередь, на проблемных участках, а со временем и по всей трассе. В настоящее время разработаны методики закладки и оборудования измерительных полигонов, апробированы методы наблюдений, а также предложены новые методы обработки и детального анализа результатов измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №08-05-00145а).

Литература

- Savchenko S.N., Kasparyan E.V.** The theoretical principles in geomechanical monitoring data processing for a block medium. *Сб. докладов Междунар. конф. "Роль геомеханики в устойчивом развитии горной промышленности и гражданского строительства", 11-15 июня 2007, Несебыр, Болгария, с.V.1-V.8, 2007.*
- Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н.** Сейсмичность при горных работах. *Под ред. Н.Н. Мельникова, Апатиты, КНЦ РАН, 325 с., 2002.*
- Комаров С., Санников А., Силантьев О.** Когда главное – безопасность и надёжность. *Нефть России, № 5, с.49-51, 2008.*