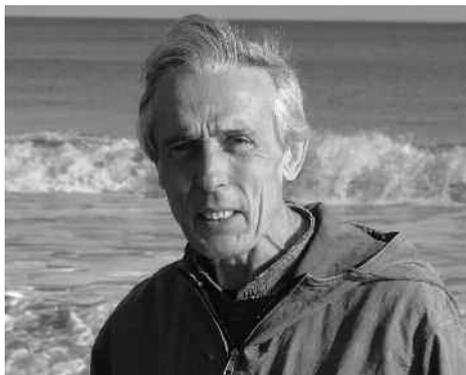


## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ



**Кафтан Владимир Иванович,**

заведующий лабораторией спутниковой геодезии  
и геодинами ЦНИИГАиК, доктор технических наук,  
Почётный геодезист

Многообразная деятельность человека стала заметно влиять на окружающую среду, и это уже привело к возникновению комплекса проблем – экологических, экономических, социальных. Строятся АС, химические комплексы вблизи крупных городов, сооружаются водохранилища с высотными плотинами в горных районах непосредственно над густонаселенными территориями, создаются крупные комплексы по добыче полезных ископаемых с громадным объемом извлекаемых из недр жидкости и твердой породы. В ряде случаев техногенное влияние на литосферу уже столь велико, что его можно сравнить с катастрофическими природными процессами. Например, разрушительные «плотинные» землетрясения Койна в Индии, Кремаста в Греции; многометровые просадки земной поверхности и наведенная сейсмичность в результате длительной разработки месторождений углеводородов. Подобная постоянно увеличивающаяся техногенная нагрузка на среду обитания человека территориально сильно сконцентрирована, что усиливает негативные последствия катастрофических ситуаций.

Инициированное воздействие на среду могут оказывать почти все крупные и уникальные промышленные системы и объекты, сконцентрированно расположенные в условиях аномально напряженной геофизической среды.

В связи с этим возникает экстренная необходимость контролировать напряженно-деформированное состояние сооружений, а также и литосферы в местах концентрации техногенной нагрузки.

Кратко рассмотрим состояние исследований и работ по геодезическому мониторингу ответственных сооружений в России и за рубежом.

Систематические геодезические наблюдения за движениями земной поверхности в районах крупных водохранилищ начались в 1970 году с момента образования в ЮНЕСКО Рабочей группы «Сейсмические явления, связанные с большими водохранилищами». В Советском Союзе основные геодезические наблюдения на специально созданных в районах ГЭС геодинамических полигонах

выполнялись подразделениями Роскартографии (ранее ГУГК при СМ СССР). Порядок работ был предусмотрен Программой ГКНТ 0.74.03. Научно-методическое руководство работами осуществлялось силами ЦНИИГАиК.

Одной из наиболее важных проблем этого вида контроля устойчивости являлось, в первую очередь, изучение, так называемой возбужденной сейсмичности. В 60-е годы прошедшего столетия в районах вновь образованных водохранилищ (в Замбии, Греции и Индии) произошло три сильных землетрясения, принесших разрушения и человеческие жертвы. Наиболее ярким примером возбужденной сейсмичности является землетрясение магнитудой  $6 < M < 6.5$  в районе плотины Койна (Индия), произошедшее 10 декабря 1967 года. Погибло 200 человек и был нанесен большой экономический и социальный ущерб [Гупта, Растроги, 1979]. До наполнения водохранилища район считался асейсмичным. Одновременно с наполнением начались землетрясения. При достижении максимального уровня воды, произошло сильное землетрясение. Позднее исследователи обнаружили корреляцию изменения уровня воды с изменениями сейсмической активности [Gouch D., Gouch W., 1970].

К настоящему времени известно несколько десятков случаев влияния наполнения водохранилищ на сейсмический режим. Среди наиболее значительных отмечаются плотина Талбинго (Австралия), Хендрик-Фервуд (ЮАР), Вайонт (Италия), Монтенар и Греем-Валь (Франция), Марафон (Греция) и др.

В Советском Союзе явление возбужденной сейсмичности было уверенно зафиксировано в районе Нурекского водохранилища [Возбужденная сейсмичность..., 1975]. Инструментальные наблюдения показали, что эпицентры большинства толчков располагаются под водохранилищем на глубине до 5 км. Магнитуда землетрясений составляла 4–4.5. Обнаружена четкая корреляция значительных изменений уровня и объема воды с интенсивностью толчков. Во время заполнения Чиркейского водохранилища произошло два умеренных землетрясения с магнитудой 5–5.2.

Согласно рекомендациям Рабочей группы ЮНЕ-СКО, проектирование водохранилищ в сейсмических зонах должно начинаться с изучения сейсмической истории района и его тектоники. Предварительно необходимо выявить потенциально активные геологические структуры.

Вторая стадия исследований начинается за год или два до наполнения водохранилища. Она включает инструментальные исследования: установку постоянно-действующей сейсмометрической аппаратуры, определение естественных напряжений методом гидравлического разрыва, геодезические наблюдения за движениями земной поверхности и активностью тектонических разломов.

До настоящего времени контроль движений и деформаций земной поверхности в районах водохранилищ выполнялся традиционными геодезическими методами. Для этого создавались плановые и высотные контрольные сети. Одну из первых схем геодезических построений, применимых для горных водохранилищ в 1978 году предложил Я.В.Наумов [Наумов, 1978]. Позднее эта схема была усовершенствована путем учета разрывных тектонических нарушений при построении контрольной сети.

Существующие контрольные геодезические сети водохранилищ ориентированы на применение главным образом традиционных геодезических средств и методов, что существенно снижает их эффективность ввиду интенсивного развития современных спутниковых средств.

Основная картина деформаций земной поверхности в связи с влиянием водохранилищ выражается в прогибе земной поверхности и раздвижении берегов. Тем не менее, реакция берегов на наполнение водохранилищ бывает различной. Это, во-первых, естественная реакция их опускания в связи с возрастанием нагрузки, и, во-вторых, как ни странно, поднятие (всплывание), связанное со взвешиванием горных пород при их насыщении водой. «Всплывание» берегов особенно ярко проявилось в районе Токтогульской ГЭС, расположенной на реке Нарын. Основная часть Токтогульского водохранилища расположена в Кетменьтюбинской котловине, заполненной на глубину до 1 км осадочными водопроницаемыми породами.

При применении традиционных (не спутниковых) технологий программа работ заключалась в следующем.

До наполнения водохранилища выполнялись один-два цикла геодезических измерений, после наполнения – один цикл в год. В руководстве [Геодезические методы ..., 1985] предложено после наполнения водохранилища выполнять пять циклов измерений, и на основании их анализа делать вывод о необходимости их продолжения.

Регулярные геодезические измерения на геодина-

мических полигонах крупных гидроэнергетических комплексов выполняются производственными подразделениями Роскартографии. Основные из них это Ингурский, Токтогульский, Чиркейский, Нурекский и Чарвакский. В настоящее время это территории зарубежных государств и поэтому проведение геодезического мониторинга силами Роскартографии прекращено. Тем не менее, в рамках сотрудничества между государствами СНГ ведутся переговоры об использовании Российских специалистов для продолжения этих работ.

Контроль устойчивости, собственно, плотин выполнялся геодезистами другой отрасли. Эти наблюдения входили в сферу деятельности института «Гидропроект». Специалисты института создавали локальные контрольные геодезические сети пунктов, расположенных, как на берегах, так и в теле плотины (в ее потерне). Контроль устойчивости выполнялся с применением высокоточных лазерных дальномеров и оптических теодолитов. Высотная компонента определялась геометрическим нивелированием. Для этих целей разрабатывались специальные конструкции геодезических центров. Для плановых наблюдений разрабатывались центры с принудительным центрированием. Для высотных – специальные глубинные реперы, монолиты которых углублялись вплоть до их соединения с коренными кристаллическими породами. В настоящее время ввиду недостаточности финансирования и реорганизации отраслей такие работы практически прекращены. Ответственность за их выполнение лежит на собственниках конкретных объектов.

Кратко рассмотрим состояние аналогичных работ за рубежом.

В Индии продолжают геодезические наблюдения на упомянутой выше плотине Койна в связи с индизированием сейсмической активности [Kulkarni, et al., 2004].

Современная контрольная сеть GPS представлена на Рис. 1.

Как можно видеть, создана многоцелевая геодезическая сеть, обеспечивающая контроль стабильности земной поверхности территории, активного тектонического разлома и, одновременно собственно инженерного сооружения. Контрольные пункты располагаются не только на верхней части плотины по ее оси, но и на ее теле, а также на основании.

Измерения в сети выполняются отдельными циклами продолжительностью 6–8 часов с интервалом регистрации спутников 15 с, элевационной маской 150 в режиме «статика». С 2000 года выполнено девять циклов повторных измерений продолжительностью около трех недель.

Применены GPS-приемники Trimble 4000SSI Geodetic System Surveyor с антенной choke и Trimble 5700 GPS Total Station с антенной Zephyr фирмы Trimble Navigation, Sunnyvale, California.

Сеть GPS наблюдений для контроля деформаций в районе Койна  
GPS NETWORK MAP, MAY 2001

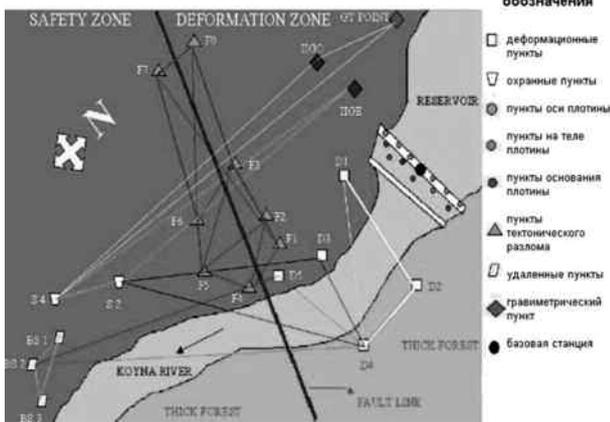


Рис. 1 Контрольная геодезическая сеть в районе плотины Койна (Индия)

Характер деформирования плотины представлен на Рис. 2.

В течение периодов декабрь 2002 – май 2003 и декабрь 2003 – апрель 2004 гг. плотина демонстрирует отрицательный изгиб, соответствующий смещению частей плотины в южном направлении. Неожиданное резкое уменьшение давления воды во время фазы ее сброса уменьшает нагрузку на конструкцию, индуцируя движения основания дамбы. В результате вся конструкция значительно наклоняется или поворачивается и приводит к смещениям ее вершины в сторону навстречу потоку.

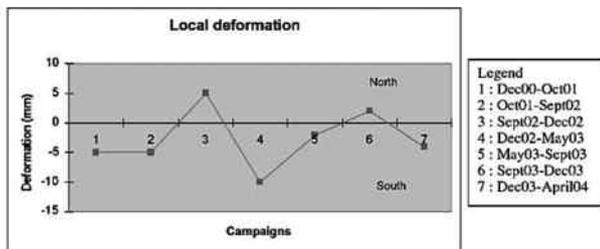


Рис. 2 Ход деформаций плотины в течение периода наблюдений.

В течение фазы наполнения с мая по сентябрь 2003 г. отрицательная деформация показывает смещение плотины в южном направлении. Это, вероятно, связано с быстрым повышением уровня воды на 24 м. Это приводит к наклону плотины по направлению течения реки.

Исследования показывают, что отклонения плотины возрастают очень значительно для уровней до 625 м и очень быстро при превышающих уровнях. Подобрана полиномиальная форма зависимости деформации от уровня.

Проведенные работы показали, что система GPS является высокоэффективным средством изучения деформаций с высокой точностью.

Несколько иная технология контроля устойчивости применяется в США при изучении деформаций в районе плотины Пакоима (Калифорния) [Kenneth W.

Hudnut and Jeffrey A. Behr, 1998]. Конструкция высокогорной плотины представлена на рис. 3.

В сентябре 1995 г. система из трех постоянно функционирующих GPS приемников создана для контроля устойчивости плотины Пакоима по отношению к опорному устойчивому пункту Файр Кэмп 9, удаленному на 2.5 км от плотины. Контроль устойчивости плотины выполнялся в почти реальном времени объединенными усилиями Геологической службы США и администрации округа Лос Анджелес с использованием инфраструктуры Южнокалифорнийской объединенной GPS сети (SIGN). Выполненные исследования продемонстрировали высокую эффективность GPS наблюдений при мониторинге высокогорных плотин.



Рис. 3 Общий вид плотины Пакоима и двух постоянно действующих GPS пунктов.

Один из пунктов контрольной сети размещен на соединении плотины с кристаллическим горным массивом, второй установлен в центре ее арки (см. Рис.4).

Наблюдательная система использует Р-кодовые GPS приемники коммерческого назначения. Интервал регистрации спутников был установлен равным 30 с. Данные накапливались в памяти приемников и передавались по телефонным модемам один раз в сутки. Данные передавались в Институт океанографии (Региональный центр обработки данных).

Начиная с января 1996 г. данные обрабатывались ежесуточно, как часть Южнокалифорнийской сети GPS наблюдений с целью прогноза землетрясений. При обработке суточных сеансов использовался программный пакет GAMIT. Результаты обработки продемонстрировали точность определений в плане 1 см и по высоте 2 см. Позднее с использованием точных эфемерид спутников были получены точности 4–6 и 12 мм, соответственно.



Рис.4 GPS пункт в центре арки плотины Пакоима

Результаты исследований показали, что применяемая технология мониторинга в почти реальном времени обработки суточных данных вполне удовлетворяет необходимым требованиям. Рассмотрен вариант применения сетевой кинематики в реальном времени. Он оказался на несколько порядков превышающим по стоимости применяемую технологию статических суточных сеансов.

На Рис. 5 показаны рабочие моменты мониторинга деформаций плотины Либби (США).



Рис.5 Плотина Либби и установка GPS станции на скальных породах склона водохранилища.

Отечественный опыт геодезического контроля устойчивости мостов, высотных зданий и сооружений существенно ограничен ввиду отсутствия достаточно сложных мостовых конструкций и высотных сооружений, требующих такого контроля.

Высокоточные геодезические измерения в России выполняются, как правило, при строительстве мостов во время разбивочных работ и выноса в натуру сооружения. Для этих целей традиционными средствами геодезических измерений создается сеть мостовой триангуляции, пункты которой располагаются на противоположных берегах реки. При этом создаются специальные геодезические центры с принудительным центрированием с целью обеспечения наиболее высокой точности последующих разбивочных работ. В последствии указанные пункты можно использовать для контроля деформации мостовых сооружений, но такие наблюдения в России не проводились.

В настоящее время имеется необходимость в проведении указанных работ ввиду применения наиболее современных мостовых конструкций, например, таких как вантовые. К таким мостам предъявляются более высокие эксплуатационные требования и создание специальных контрольных сетей необходимо. За рубежом такой опыт исследований имеется.

Одним из немногих высотных сооружений России, за устойчивостью которого велись многократные геодезические измерения, является Останкинская телевизионная башня. В этом случае создана и функционирует специальная геодезическая служба контроля устойчивости башни. Контрольные измерения проводятся регулярно по несколько раз в сутки. При этом используются традиционные геодезические измерительные средства и методы: оптические измерения углов и

электронные измерения расстояний до уголкового отражателя, установленных на разных высотах сооружения. Результаты контроля демонстрируют движение шпиля башни по окружности диаметром в несколько метров. Современная спутниковая аппаратура при этом не применяется.

Согласно инструкции Минсвязи [Инструкция по эксплуатации..., 1982] инструментальная геодезическая проверка проектного положения ствола антенной опоры должна проводиться один раз в год, а также при внеплановом обследовании опоры. Внеплановое обследование опоры должно проводиться после сильного ветра (более 20 м/с), землетрясения и быстрого снеготаяния, во время которого были замечены большие потоки воды, представляющие особую опасность для фундаментов опор, установленных на просадочных и вечномёрзлых грунтах. Осадку фундаментов антенных опор проверяют в первый и третий годы эксплуатации, в дальнейшем частота проверки осадки зависит от характера изменения ее величины (при нарастании – два раза в год до стабилизации).

Сегодня актуальность контроля вертикальности и устойчивости антенн значительно возросла, в связи с развитием средств мобильной связи. Число антенн, устанавливаемых непосредственно в населенных пунктах и вблизи них, постоянно возрастает. Отдельные юридические лица (ОАО, ЗАО и т.п.) разрабатывают собственные нормативно-методические правила по геодезическому контролю. Так, например, ОАО «Мобильные ТелеСистемы» разработало собственную методику контроля вертикальности башен, монтируемых ЗАО «Строительство и Связь». Методика содержит лишь порядок выполнения геодезического контроля вертикальности традиционными геодезическими методами, и, главным образом, в процессе собственно установки антенной опоры.

В отношении контроля устойчивости высотных зданий, геодезические измерения в России применяются редко, ввиду малого числа таковых, требуемых специального мониторинга, по аналогии с «небоскребами» зарубежных государств. В настоящее время в связи с планами Правительства Москвы необходимость в таком мониторинге возрастает.

Рассмотрим состояние подобных работ за рубежом.

Традиционно для контроля высотных зданий и сооружений за рубежом до недавнего времени применялись классические геодезические методы, а ветровая и сейсмическая нагрузки контролировались с использованием датчиков ускорений – акселерометров. В современных условиях все большее применение для этих целей начинают находить спутниковые геодезические методы. Так, например, в статье [Xiaoqing Li et al., 2006], сообщается о разработанной в рамках международной кооперации системы контроля устойчивости высотных сооружений с использованием GPS кинематики в реальном времени и датчиков ускорений, совместно с такими дополнительными средствами, как анемометр и регистратор напряжений.

Система была установлена (Рис. 6) на 108-метровой

стальной башне в Токио, принадлежащей Японской Корпорации Городского развития, с целью контроля деформаций на непрерывной основе. Вторая GPS антенна была установлена на крыше фундаментально-го 16-метрового здания, как опорный пункт в 110 м от башни. Регистраторы напряжений были установлены на основании башни. Локальная система координат была таковой, что ее горизонтальные оси были направлены на восток и север, а вертикальная, соответственно, в зенит. Несмотря на то, что положение опорной антенны не являлось идеальным из-за экранирования небосвода контролируемой башней, закрывающей горизонт до  $40^\circ$  по высоте и  $7^\circ$  в плане, этим обстоятельством пренебрегли ввиду незначительной площади покрытия.

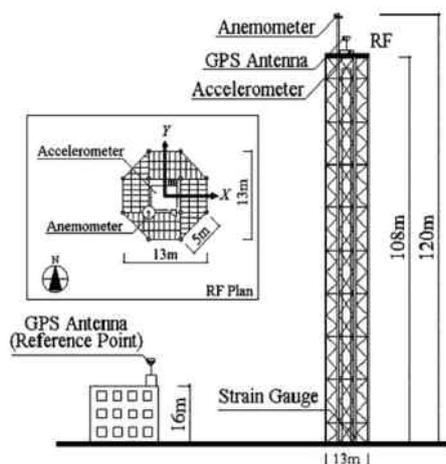


Рис. 6. Схема расположения измерительной аппаратуры при контроле устойчивости высотной башни.

Измерения RTK-GPS и акселерометра выполнялись с частотой 10 и 20 Гц, соответственно. Измерения были выполнены во время Тайфуна №21 в октябре 2002 г. и землетрясения с магнитудой 7 баллов 26 мая 2003 г., произошедшего на глубине 71 км. В анализе полученных временных рядов смещений и ускорений была применена фильтрация Быстрым преобразованием Фурье. Отфильтрованные данные путем двойного интегрирования из ускорений акселерометра преобразовывались в смещения и путем двойного дифференцирования из смещений RTK-GPS конвертировались в ускорения. Результаты продемонстрировали высокую степень согласованности, но применение спутниковой технологии обеспечило надежную регистрацию статических и квази-статических нагрузок. Что убедительно показало эффективность контроля устойчивости за счет привлечения современных спутниковых средств.

Аналогичная система контроля устойчивости с 1996 г. применяется для высотного здания отеля Республика Плаза в Сингапуре.

Столица расположена в районе с отсутствием местной сейсмической активности и сильных циклонов и антициклонов, поэтому основным ограничением на высоту зданий являются требования авиации, допускающие высоту строений до 260 м. В настоящее время в

Сингапуре офисные здания не превышают 150 м, но некоторые жилые (гостиничные) здания достигают 168 м. Шестидесяти шести этажное здание гостиницы Республика Плаза имеет высоту 280 м. Ввиду того, что контролируемая территория располагается в 700 км от мест эпицентров сильнейших в истории землетрясений, контроль устойчивости столь высокого сооружения крайне необходим.

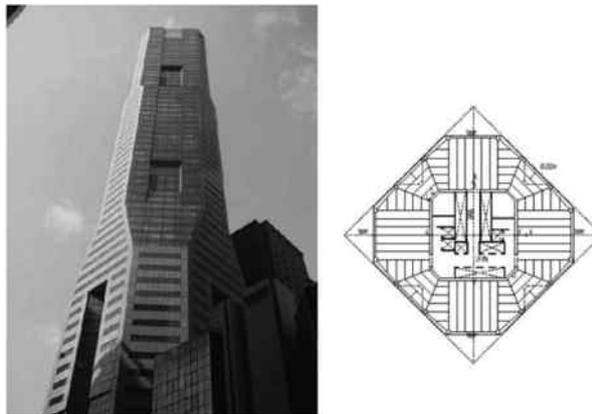


Рис. 7. Общий вид отеля Плаза и план капитальных стен на уровне 16-го этажа.



Рис. 8. Установка одной из антенн GPS и анемометра на крыше отеля Плаза.

В контроле деформаций применена двухроверная GPS система, обеспечивающая контроль устойчивости здания не только как целого жесткого тела, но и позволяющая отслеживать изгибы и вращения. Опорный пункт GPS был удален на 10 км от здания. В наблюдениях был применен метод кинематики в реальном времени. Измерения выполнялись в начале 2003 и в первой половине 2004 гг. Авторы отмечают наличие технических проблем, связанных с перегревом измерительной аппаратуры и перебоями в энергообеспечении. Показано, что точность определения смещений по GPS составила 3 мм. Вибрация с меньшими амплитудами надежно регистрировалась акселерометром. Во время шторма смещения достигали 150 мм. Этот результат продемонстрировал важность комплексирования традиционной аппаратуры со спутниковой. Тем не менее, авторы отмечают, что физическую природу наблюдаемых статических и квазистатических перемещений во многих случаях пока что не уда-

ется установить. Для этого необходимы продолжительные и непрерывные наблюдения.

Наиболее яркий пример контроля устойчивости мостовых сооружений представлен в работе [Kai-uen Wong et al., 2001], где описана технология контроля стабильности вантовых мостов в Гон Конге. Контроль осуществляется за тремя протяженными вантовыми мостами (Рис. 9). Протяженность мостов изменяется от 800 до 1200 м, что требует сложной и трудоемкой технологии соответствующих геодезических работ.

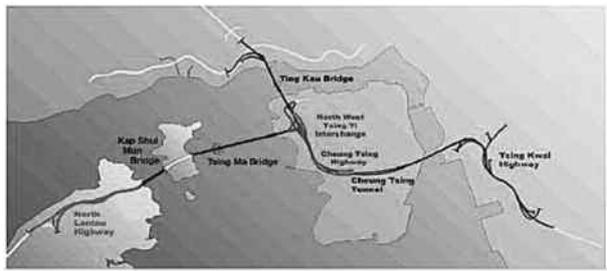


Рис.9 Взаимоположение вантовых мостов Гон Конга

Мосты оснащены 774 специальными сенсорами, такими как анемометры, термометры, датчики динамики веса в движении, акселерометры, датчики смещений, станции контроля уровня и датчики напряжений. В 2001 г. в состав контрольного оборудования была включена Система контроля конструкций с использованием GPS измерений в реальном времени (GPS-OSIS). Система достаточно сложна и состоит из пяти подсистем: собственно GPS-приемники, система локального и глобального сбора данных, компьютерная система и волоконно-оптическая сеть. Система повышает эффективность контроля стабильности конструкций за счет

- регистрации смещений, отражающих нагрузки и напряжения
- обеспечения большего объема информации для оценки распределения напряжений основных компонентов мостов
- документирования аномальных событий, таких как тайфуны, землетрясения, транспортные перегрузки и столкновения судов с опорами мостов
- регистрации разрушений или их накопления на основных компонентах мостов
- оценки возможностей сопротивления мостов нагрузкам и реальности конструктивных характеристик и параметров
- обеспечения информацией по организации инспекций и ремонта мостов.



Рис. 10 Общий вид мостов (вверху) и схемы установки GPS приемников (внизу).

Схема установки GPS приемников представлена на Рис. 10. Пример установки GPS антенны на опоре вантового моста представлен на Рис. 11.



Рис. 11 Установка GPS антенны на опоре вантового моста.

Авторами показано, что система эффективно контролирует положения главных мостовых конструкций в реальном времени. Путем измерения этих вариаций и совмещения их с результатами других датчиков более точно и надежно оценить состояние и степень старения конструкций главных ванто-несущих компонентов мостов. На основе выполняемого мониторинга планируется периодичность инспекций и возможных ремонтных работ.

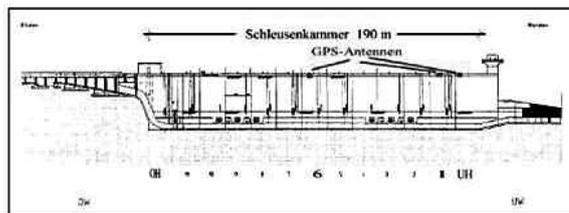


Рис. 12 Общий вид контролируемого шлюза (внизу) и схема установки GPS антенн (вверху).

Пример контроля устойчивости стен шлюзов (Рис.12) представлен в работе [Wübbena et al., 2001]. В данной публикации описаны подходы к повышению точности GPS контроля устойчивости конструкций до субмиллиметрового уровня.

Повышение точности обеспечивается за счет применения специальных методик калибровки фазовых центров спутниковых антенн и ослабления эффекта многопутности. Путем комбинации методов ослабления многопутности и поправок за калибровку фазовых центров антенн авторы добиваются кинематического определения положения с точностью 1 мм.

На основе анализа современного состояния отечественных и зарубежных работ и исследований по контролю стабильности опасных объектов оценим возможность и целесообразность использования для этих целей современных спутниковых измерительных средств.

Диапазон достигаемой точности наблюдений за смещениями и деформациями изменяется от первых мм до см. Достижение около миллиметровых точностей возможно при использовании специальных усложненных технологий, обеспечивающих ослабление систематических и случайных ошибок. Реально достижимая точность периодического контроля устойчивости в режиме

статических измерений близка к нескольким мм. При непрерывном мониторинге в реальном времени реальная точность составляет 1–2 см. Этого достаточно для большого диапазона решаемых задач, таких как контроль движений и деформаций выработок и оползневых склонов. Тем не менее, для того, что бы иметь возможность более надежного прогноза надвигающегося опасного события точность наблюдений необходимо повышать.

Преимущества спутниковых методов перед традиционными состоят, главным образом, в их более высокой оперативности, чем в точности. Так, на сегодня, точность определения вертикальной компоненты средствами GPS гораздо ниже горизонтальной и ниже точности определения высоты традиционным геометрическим нивелированием.

Анализ современного состояния проблем показал, что применение современных спутниковых методов существенно повышает эффективность и оперативность контроля.

Представляется, что особенно в условиях России требуется более широко применять средства СРНС для инженерно-геодезического контроля опасных объектов и территорий.

#### Литература:

1. Возбужденная сейсмичность вблизи Нурекского водохранилища. Труды Института сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР.– Душанбе: Дониш, 1975.– 89 с.
2. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах.– М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1985.– 112 с.
3. Гупта Х., Растоги Б. Плотины и землетрясения.– М.: Мир, 1979.– 251 с.
4. Инструкция по эксплуатации антенных сооружений радиорелейных линий связи, Москва «Радио и связь», 1982 г., 47 с.
5. Методика контроля вертикальности башен ОАО «Мобильные ТелеСистемы», монтируемых ЗАО «Строительство и Связь», 2003
6. Наумов Я.В. Геодезические работы по изучению движений земной коры в районах строительства высоких плотин.– В кн.: Современные движения земной коры.– Новосибирск, 1978.– с.152–154
7. BROWNJOHN James, RIZOS Chris, TAN Guan-Hong, PAN Tso-Chien. Real-Time Long-Term Monitoring of Static and Dynamic Displacements of an Office Tower, Combining RTK GPS and Accelerometer Data. Reports of the 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004, 15 p.
8. Gouch D., Gouch W. Load-induced earthquakes of lake Kariba.– Geophys. J., 1970, V.21, p.79–101
9. Kai-yuen Wong, King-leung Man, Wai-yee Chan. Monitoring Hong Kong's bridges. Real-time kinematic spans the gap. GPS World.– July 2001.– 8 pp.
10. Kenneth W. Hudnut and Jeffrey A. Behr. Continuous GPS monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California.– Seismological Research Letters, July/August 1998 issue (vol. 69, No. 4; pp. 299–308)
11. Kulkarni M.N., Radhakrishnan N., Rai D. Deformation Studies of Koyna Dam.– GPS World.– Nov 1, 2004
12. Xiaojing Li, Linlin Ge, Eliathamby Ambikairajah, Chris Rizos, Yukio Tamura, Akito Yoshida. Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system. GPS Solution (2006) DOI 10.1007/s10291-006-0023-y
13. Wübbena G., Bagge A., Boettcher G., Schmitz M., Andree P. Permanent Object Monitoring with GPS with 1 Millimeter Accuracy. Paper presented at the International Technical Meeting, ION GPS.01, September 11–14., 2001, Salt Lake City, Utah. 9 pp.