

УДК 553.087

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБИНЫХ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ ДАТЧИКОВ НАКЛОНА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Т.В. Падерина, В.В. Яковлев, Ю.М. Гордеев

Анализируются результаты применения первой отечественной измерительной системы с глубинными трехкоординатными датчиками наклона на базе микромеханических акселерометров при решении задачи геотехнического мониторинга горных участков олимпийской трассы Адлер – Красная поляна. Показано, что рассматриваемая система позволяет реализовать оперативный контроль горизонтальных смещений массивов грунта в течение длительного времени, обеспечивая тем самым своевременное предупреждение возможных неблагоприятных ситуаций в процессе строительства и эксплуатации объекта. Достигнутый уровень точности, составляющий несколько миллиметров, и относительно невысокая стоимость делают данную систему привлекательной при организации непрерывного контроля особо протяженных геологических объектов.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, микромеханический акселерометр, трехкоординатный датчик наклона.

Введение

Геологическое пространство (горные породы и грунты, которые служат основанием построек, строительных объектов) не является застывшей формацией. Происходящие в нем процессы – изменение уровней подземных вод, изменение химического состава последних, развитие карста – и целый ряд других факторов кардинально меняют инженерно-геологические условия в недрах, требуя проведения их постоянного контроля и изучения.

Геотехнический мониторинг – это система наблюдений и контроля за состоянием и изменением грунтовых, природных и техногенных условий в процессе строительства и эксплуатации объекта.

Арсенал технических средств геотехнического мониторинга в мире насчитывает несколько десятков наименований, среди которых – экстенсометры, датчики нагрузки, тензометрические датчики различного типа, измерители трещин и стыков, приборы для гидрогеологического контроля, оптические и спутниковые геодезические приборы, лазерные сканеры, георадары и т.д. Тем не менее, несмотря на такое разнообразие средств, постоянный мониторинг различных промышленных и геологических объектов – плотин, мостов, оползневых склонов, карьеров, территорий над горными выработками и т.п., как в России (вплоть до последнего времени), так и за рубежом (несколькими годами ранее) представлял собой достаточно трудную, а главное, чрезвычайно дорогостоящую задачу.

Ситуация кардинально изменилась с внедрением MEMS-технологий (Microelectromechanical systems), а точнее, с появлением на рынке недорогих микромеханических акселерометров (ММА) и созданием на их базе новой системы геотехнического контроля, представляющей собой сборку независимых триад ММА, установленных в гибкой водонепроницаемой трубе с целью измерения трехмерной деформации грунта на глубину до 100 м с интервалом 0,5–2,0 м. Такие системы, названные Shape Acceleration Array (SAA), впервые были применены компаниями «Geokon» (США), «Soil Instruments Ltd.» (Англия), «Measurand Inc.» (Канада) примерно в 2007–2009 г.г. [1].

Настоящая работа посвящена анализу результатов применения первых отечественных систем, подобных SAA, разработанных российской компанией ЗАО «Специальное конструкторское бюро приборов подземной навигации» («СКБ ПН») (г. Санкт-Петербург) для проведения геотехнического мониторинга горных участков олимпийской трассы Адлер – Красная поляна.

Контрольные скважины с глубинными трехкоординатными датчиками наклона

В свете современных подходов к вопросам безопасности сооружений и новой концепции строительных технологий система мониторинга должна разрабатываться уже на стадии проектирования объ-

екта, и создание такой системы целесообразно начинать с исследования современного состояния горных пород, оценки инженерно-геологических особенностей подземного пространства, возможных геологических, техногенных, технических причин зарождения деформации.

Для контроля геологического пространства строительного объекта – тоннельного комплекса, расположенного на горных участках олимпийской трассы Адлер – Красная поляна (рис. 1), наиболее эффективным и экономичным признан подход, основанный на периодической фиксации относительных смещений пород, формирующих эти склоны.

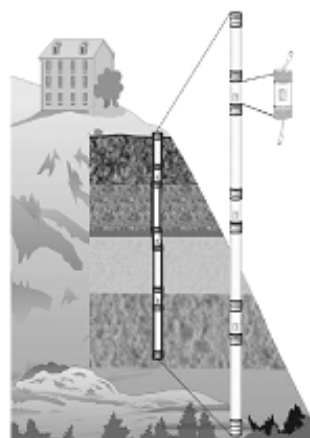


Рис. 1. Район северных порталов тоннельного комплекса № 3, июнь 2011

С этой целью используется система вертикально разбуренных контрольных скважин (рис. 2, а), обсаженных пластиковыми трубами, в которые погружаются гибкие «косы» с трехкоординатными датчиками наклона (ТДН) на базе ММА (рис. 2, б). При смещении пласта горных пород в направлении, перпендикулярном оси ствола, происходит деформация участков контрольной скважины и, как следствие, соответствующих секций косы с датчиками. На рис. 3, а, наглядно показана деформация (изгиб) участка косы из-за смещения грунта. Данный изгиб, характеризующийся углом θ , можно определить по показаниям акселерометров, установленных в косе. В свою очередь, угол θ и известное значение длины L между датчиками позволяют вычислить параметр d , который и является искомым значением горизонтального смещения грунта на данной глубине.



а



б

Рис. 2. Бурение вертикальной скважины в районе строящегося тоннеля (а); пример косы, установленной в вертикальную скважину (б)

Принципиальным условием применения данного метода является необходимость установки нижнего участка косы в массив грунта, который не подвергается деформации. Именно благодаря наличию такого «опорного» положения появляется возможность измерить все последующие смещения вышележащих пластов.

Предлагаемый метод обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с другими, ранее применявшимися при геотехническом мониторинге. К основным его достоинствам можно отнести следующие:

- исключительно протяженная зона непрерывного контроля;
- возможность повторного применения косы даже при ее значительной деформации;
- малый диаметр косы и, в силу этого, возможность ее установки практически в любом месте контролируемого геологического пространства без нарушения его структурной целостности.

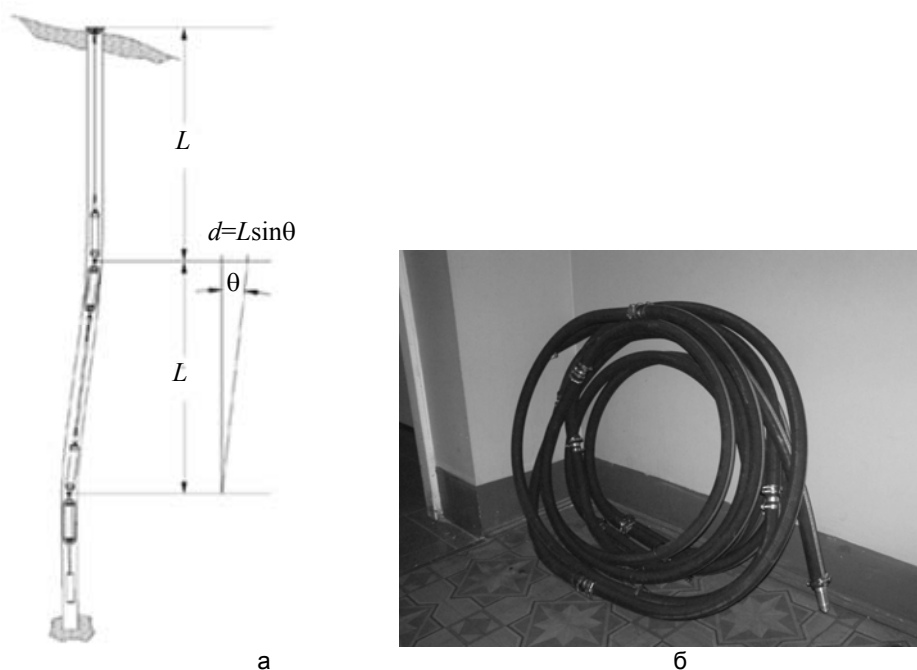


Рис. 3. Коса с ТДН: пример деформации косы, обусловленной смещением грунта (а); фрагмент косы (20м×10 ТДН), разработанной ЗАО «СКБ ПН» (б)

Специалистами компании ЗАО «СКБ ПН», в том числе и авторами данной работы, была разработана система мониторинга с использованием ТДН на базе акселерометров ADXL103 (Analog Devices). Каждый ТДН вместе с контроллером схемы питания и интерфейса, а также датчиком температуры, располагается на индивидуальном жестком шасси длиной 25 см и диаметром 27 мм. ТДН вместе с присоединенным к нему кабелем помещается в гибкую трубу-проставку, длина которой в зависимости от решаемой задачи может составлять 0,5; 1; 2 м. Объединение труб-проставок позволяет легко собрать косу нужной длины для погружения в скважину (рис. 3, б). Материал трубы-проставки выбирается специальным образом, чтобы коса могла работать только на изгиб (без скручивания). Все ТДН соединяются общим кабелем, по которому подается питание и производится считывание информации. В состав системы мониторинга также входит персональный компьютер, устройство сопряжения для подключения косы к компьютеру, программное обеспечение, осуществляющее сбор, обработку и визуальную интерпретацию поступающих данных.

Все ТДН проходят калибровку на стенде, в процессе которой определяются их масштабные коэффициенты, погрешности смещения нуля, «геометрические» параметры, коэффициенты температурного влияния. Полученный массив коэффициентов модели погрешностей каждого ТДН записывается в память соответствующего датчика и используется для коррекции его выходных показаний.

Разработке данной системы предшествовало проведение долговременных стендовых испытаний стабильности показаний применяемых акселерометров при изменении температуры окружающей среды в заданном диапазоне. Эти испытания подтвердили высокую надежность ТДН и возможность их работы с требуемыми характеристиками (чувствительность на уровне 1 угл. мин) в течение длительного времени (не менее года).

Результаты проведения геотехнического мониторинга горных склонов в ходе строительства трассы Адлер – Красная поляна

Ниже представлены результаты опытной эксплуатации рассматриваемой системы геомониторинга при строительстве горной трассы Адлер – Красная поляна в 2011 г.

Один из строительных объектов северного портала тоннельного комплекса расположен в зоне, где возможен сход оползня. В связи с этим для его мониторинга на горных склонах, непосредственно прилегающих к строительству, были установлены несколько контрольных скважин с глубинными ТДН.

Длина контрольного ствола всегда выбирается исходя из условий мониторинга конкретного геологического пространства. Для рассматриваемого строительного объекта протяженность участка горных пород, подверженных возможному смещению, составляет около 32 м, глубже располагаются более прочные грунты (мергель). Поскольку при установке контрольного ствола, как уже отмечалось выше, обязательным условием является закрепление его нижней части в прочных породах, было выбрано значение общей длины скважинного комплекса (контрольного ствола) – 38 м, при этом шаг установки ТДН L составлял 2 м.

В качестве иллюстраций на рис. 4, 5 показаны результаты измерений горизонтальных смещений массивов грунта в скважине № 1, мониторинг которых проводился в следующих числах 2011 г. – 02.09; 21.09; 05.10; 31.10; 09.11; 09.12.

Искомые смещения определялись с помощью вычисления следующих разностей:

1. $S_E^{21.09} - S_E^{02.09}$, $S_N^{21.09} - S_N^{02.09}$;
2. $S_E^{05.10} - S_E^{02.09}$, $S_N^{05.10} - S_N^{02.09}$;
3. $S_E^{31.10} - S_E^{02.09}$, $S_N^{31.10} - S_N^{02.09}$;
4. $S_E^{09.11} - S_E^{02.09}$, $S_N^{09.11} - S_N^{02.09}$;
5. $S_E^{09.12} - S_E^{02.09}$, $S_N^{09.12} - S_N^{02.09}$,

где $S_E; S_N$ – значения восточной и северной координаты контрольной скважины, рассчитанные в соответствующий день 2011 г. (верхний индекс) [2]. Полученные таким образом горизонтальные смещения массивов грунта отображены на рис. 4, 5. Анализ результатов мониторинга показал, что общий устойчивый сдвиг массивов грунта в скважине № 1 наблюдался до глубины 27 м, при этом наибольшее смещение, как и ожидалось, претерпели пласты, расположенные вблизи поверхности горного склона. Устье скважины № 1 за весь интервал наблюдения сдвинулось в направлении востока на 172 мм (рис. 4), в направлении севера (рис. 5) – на 210 мм.

Сравнение значений горизонтальных смещений устьев контрольных скважин, рассчитанных приведенным выше способом, с аналогичными параметрами, полученными с помощью используемой на территории строительства трассы Адлер – Красная поляна системы GPS-мониторинга, показало их хорошую корреляцию (невязка показаний составляет около 1%).

Надо отметить, что в последние годы метод спутниковой геодезии все чаще стал применяться при строительстве тоннелей, сооружении мостов, прокладке магистральных трубопроводов и т.д. Специфика этого метода для решения геодезических задач высокоточного измерения координат наземных объектов состоит в использовании относительных измерений, при которых дальности до спутников определяются фазовым методом и по ним вычисляются приращения координат между станциями с установленными спутниковыми приемниками [3].

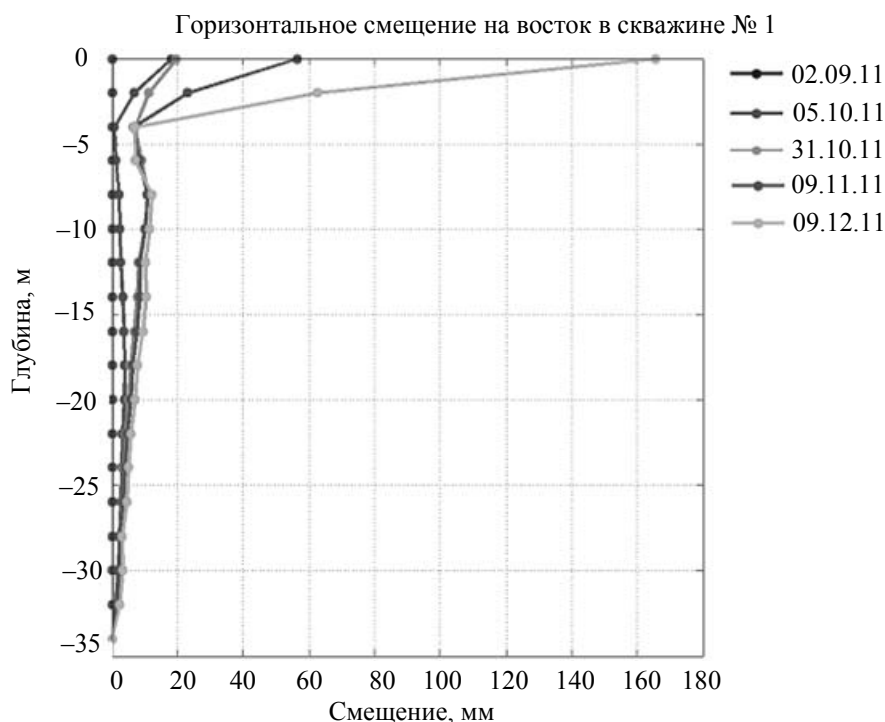


Рис. 4. Смещение массивов грунта по линии запад-восток в скважине №1

Многочисленный опыт работ с использованием спутниковых методов показывает, что при благоприятном расположении спутников и при исключении многолучевого распространения сигнала возможно достижение точности измерения координат на уровне нескольких миллиметров ($\pm(3-5)$ мм) [4]. В связи с этим с большой уверенностью можно считать, что точность представленной в данной работе системы геомониторинга на базе ТДН находится в этих же пределах.

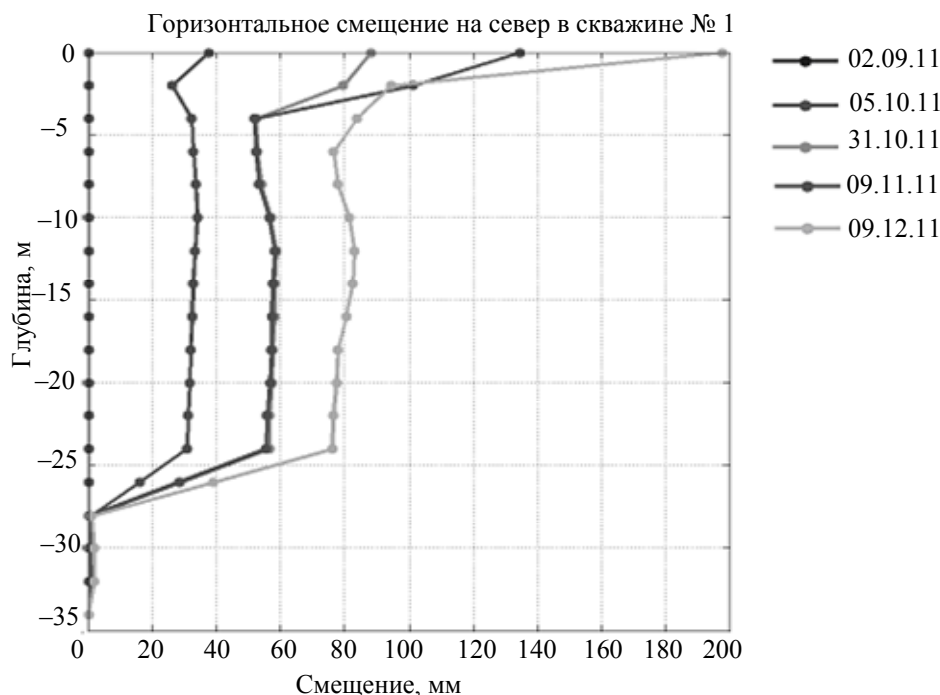


Рис. 5. Смещение массивов грунта по линии север–юг в скважине №1

Заключение

Результаты применения первой отечественной измерительной системы с глубинными трехкоординатными датчиками наклона при решении задачи геотехнического мониторинга горных участков олимпийской трассы Адлер – Красная поляна подтвердили ее высокую надежность и способность обеспечить контроль горизонтальных смещений и деформаций массивов грунта с высокой точностью в течение длительного времени. Данная система позволяет реализовать практически круглосуточные геотехнические измерения и наблюдения, без которых невозможно своевременное предупреждение различных неблагоприятных ситуаций в процессе строительства и эксплуатации промышленных объектов.

Литература

1. Bennett V., Zeghal M., Abdoun T. Wireless Shape-Acceleration Array System for Local Identification of Soil and Soil Structure Systems // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – V. 12. – P. 60–66.
2. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Лысенко А.С., Федорович А.Н. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации. Проблемы и решения // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 4. – С. 92–110.
3. Трехо Сото Мануэль. Математический анализ спутниковых геодезических сетей при изучении деформаций инженерных сооружений // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 1. – С. 67–75.
4. Трехо Сото Мануэль. Оценка точности топоцентрических прямоугольных координат при изучении деформаций крупных инженерных сооружений спутниковыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2006. – № 6. – С. 75–86.

- Падерина Татьяна Владимировна** – ОАО « Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, paderinata@rambler.ru
- Яковлев Владимир Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, v-v-y@ua.ru
- Гордеев Юрий Михайлович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, 133880@gmail.com