

УДК 550.8: 528.482

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ GNSS-ИЗМЕРЕНИЙ  
И КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФОРМАЦИЙ  
ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

***Овчаренко Аркадий Васильевич***

*Старший научный сотрудник Института Геофизики Уральского отделения РАН,  
горный инженер-геофизик, кандидат физико-математических наук*

***Беликов Виктор Тихонович***

*Заместитель директора по научной работе Института Геофизики УрО РАН,  
астрономо-геодезист, доктор физико-математических наук, профессор*

***Угрюмов Иван Александрович***

*Старший инженер Института Геофизики УрО РАН УрО РАН, горный инженер-геофизик*

***Баладин Дмитрий Вячеславович***

*Начальник отдела развития и эксплуатации КС Управления информатизации Уральского  
Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
инженер информационных систем*

***Юрий Евгеньевич Козлов***

*Генеральный директор ООО НПК «Экотехнологии», кандидат технических наук, академик  
Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*

***Хильманович Валерий Михайлович***

*Технический директор ООО НПК «Экотехнологии»*

***Незнаева Елена Львовна***

*Заведующая лабораторией геодезии ООО НПК «Экотехнологии», кадастровый инженер*

***Комишилов Виталий Игоревич***

*Инженер-геодезист ООО НПК «Экотехнологии»*

Методика комплексного мониторинга высотных сооружений предусматривает инструментальное определение частот собственных колебаний по различным формам, измерение временных рядов смещений характерных точек конструкции, вычисление линейных и крутильных деформаций и напряжений вдоль высотного профиля и превышение их критических значений. Для решения этих задач проектируется сеть измерительных точек, решается проблема обеспечения оптимальных условий приема спутниковых сигналов GPS+Глонасс (GNSS), выполняется мониторинг достаточной длительности, выполняются обработка и целевой анализ данных GNSS с построением динамических моделей реального поведения объекта при переменных ветровых воздействиях. Для измерений применяется комплекс аппаратуры Topcon GB-500/1000, Trimble-5700, гравиметр-сейсмометр CG5-Scientrex, портативная сейсмическая станция, портативная метеорологическая станция. GPS/Glonass измере-

ния выполняются по методике короткобазисных измерений с частотой опроса 5-10 Гц (псевдо-RTK). Крепление антенн на объекте и на базисных станциях выполняется на жесткие короткие штыри, исключающие смещения-помехи. Одна или две базисные станции располагаются на расстоянии не более 1 км от объекта исследования. Обработка данных выполняется по программам Gamit, с применением универсальных, а также вспомогательных собственных утилит. Анализ результатов временных рядов смещений (рис. 1) и построение динамических моделей поведения объекта выполняется собственными авторскими средствами. Например, для проведения исследований на 100 метровой стальной дымовой трубе была развернута временная сеть из шести станций непрерывного GPS-мониторинга, три антенны были установлены на высотах 96, 75 и 50 м, одна станция – у основания трубы (1 м), две базисные станции – на соседних капитальных зданиях (рис. 2-9). Одним из оснований для постановки данных исследований было разрушение около 20% анкерных болтов крепления основания трубы. Все станции на трубе и одна базисная станция работали с частотой 5 Гц, станция у основания и одна базисная – с частотой 1 Гц. Был выполнен анализ качества приема спутниковых сигналов и обзорности неба в местах установки антенн. На основе этого показано, что материалы позволяют надежно определять временные ряды смещений.

Параллельно с GNSS-мониторингом выполнялись мониторинг метеорологических параметров, мониторинг основания с применением одного/двух гравиметров-сейсмометров, а также геодезический мониторинг нижней части трубы с помощью тахеометра-робота. В наиболее ветреные дни была выполнена кино-фотосъемка процесса колебаний и эксперименты по прямому измерению амплитуды колебаний с применением лазера, установленного на промежуточной и верхней площадках трубы. Этими экспериментами доказано, что смещения, определяемые с применением GPS-измерений, соответствуют фактическим смещениям объекта. На основе инструментальных непрерывных наблюдений в течение семи суток установлены частоты собственных колебаний основания трубы, определены скорости смещений и амплитуды нормальных и экстремальных смещений точек на высотах 96, 75, 50, 35 и 15 м. На основе данных комплексного инструментального мониторинга вычислены соответствующие временные ряды смещений, скорости смещений, ускорений характеристических точек, а также временные ряды деформаций высотного профиля и действующих напряжений на крайних анкерных болтах основания. Рассмотрены способы прямой оценки упругих деформаций и напряжений высотной линейной конструкции по полученным кинематическим данным мониторинга смещений. Предложены модель расчета и методика оценки критических напряжений на элементах конструкции, в том числе анкерных болтах основания. Рассмотрены и проанализированы ос-

новые возможные механизмы разрушения анкерных болтов со сравнительной оценкой критических кинематических параметров. Сделан вывод, что наиболее вероятными механизмами разрушения анкерных болтов являются растягивающие усилия, возникающие при удлинении (наклонах дымовой трубы) и перекосе ребер жесткости из-за ее вращательного (крутильного) движения. Количественно оценены также сдвиговый (срезающий) механизм разрушения болтов, связанный с вращательной компонентой колебательных движений. В процессе анализа наблюдательных временных рядов сделаны выводы о нескольких фактических случаях превышения критических напряжений на анкерных болтах в период мониторинга.

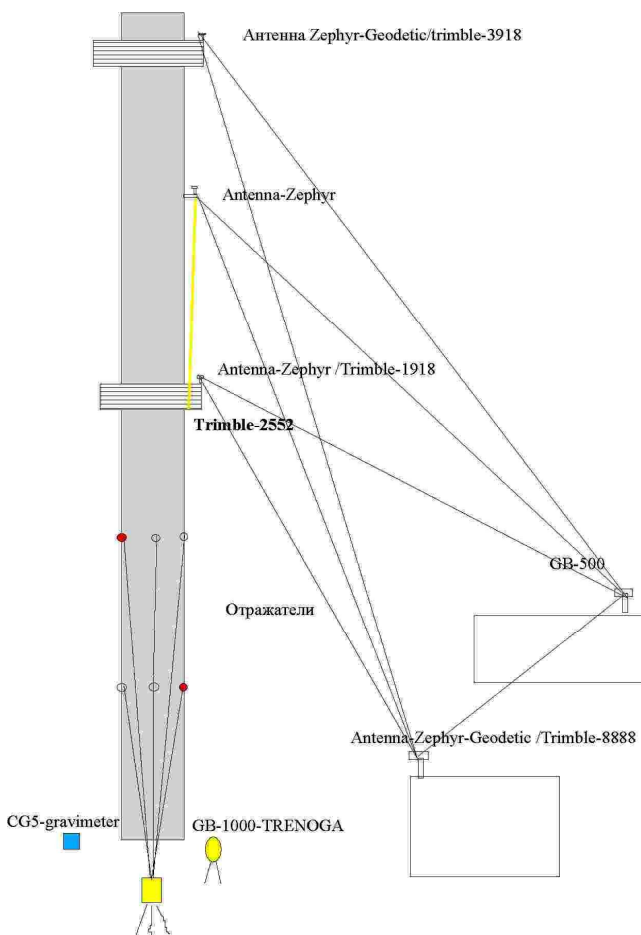


Рис. 1. Сеть комплексного мониторинга 100-метровой стальной трубы

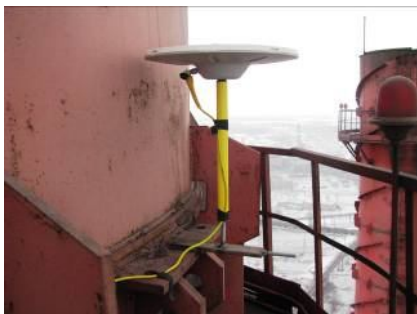


Рис. 2. Роверная станция Trimble-5700, частота регистрации 5 Гц



Рис. 3. Антенна Zephyr-Geodetic на высоте 96 м



Рис. 4. Роверная станция GPS Trimble-5700, частота регистрации 5 Гц

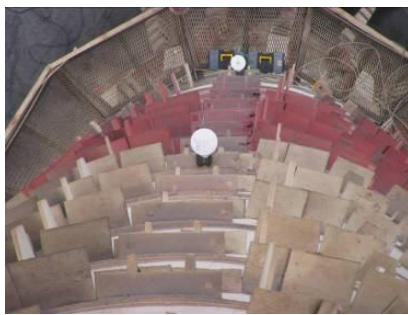


Рис. 5. Антенна Zephyr на высоте 75 м. Вид антенны с верхней площадки 96 м



Рис. 6. Роверная станция Trimble-5700. Инструментальные ящики



Рис. 7. Антенна Zephyr на высоте 50 м



Рис. 8. Базисная станция «GB-500»  
GNSS GB-500,  
частота регистрации 1 Гц



Рис. 9. Антенна Topcon CR G3.  
Полевой контроллер FS-200

Полученные временные ряды смещений точек наблюдательной сети позволяют создать ряд анимационных моделей фактических движений конструкции. Примеры анимационных динамических моделей демонстрируются в презентации.

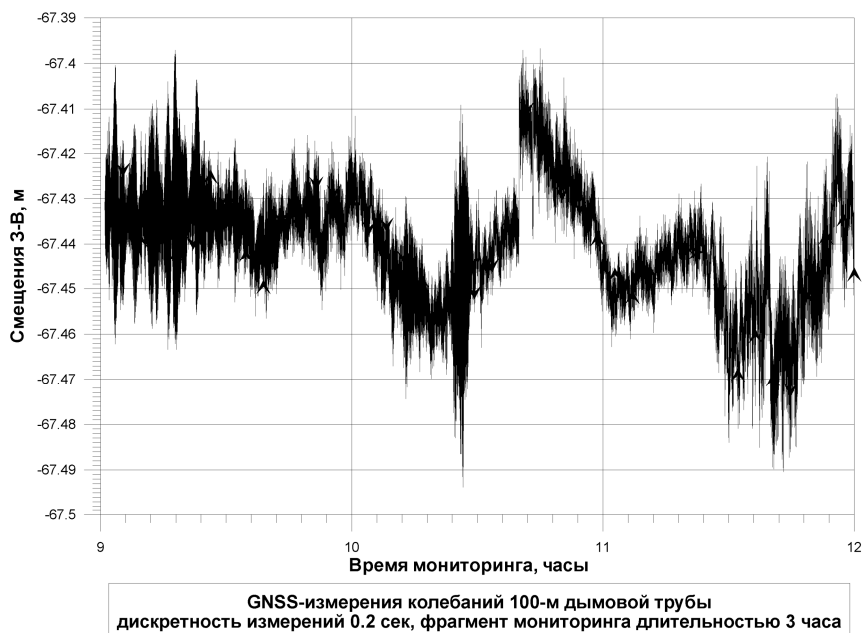


Рис. 10. Пример длительного временного ряда смещений 3-В

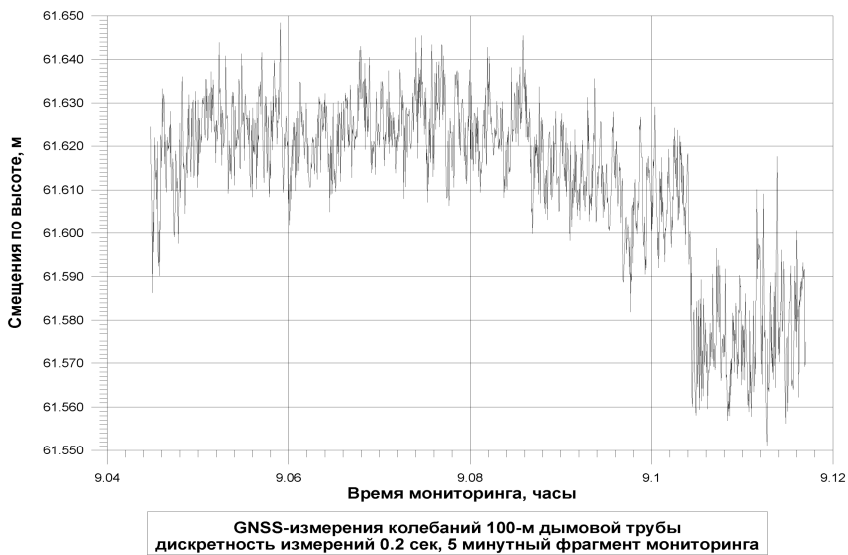


Рис. 11. Изменение высоты конструкции в процессе колебаний

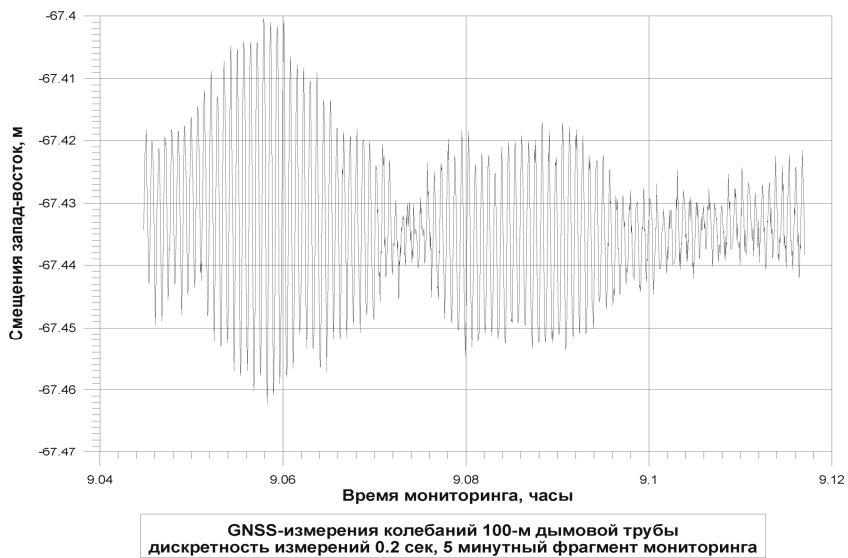
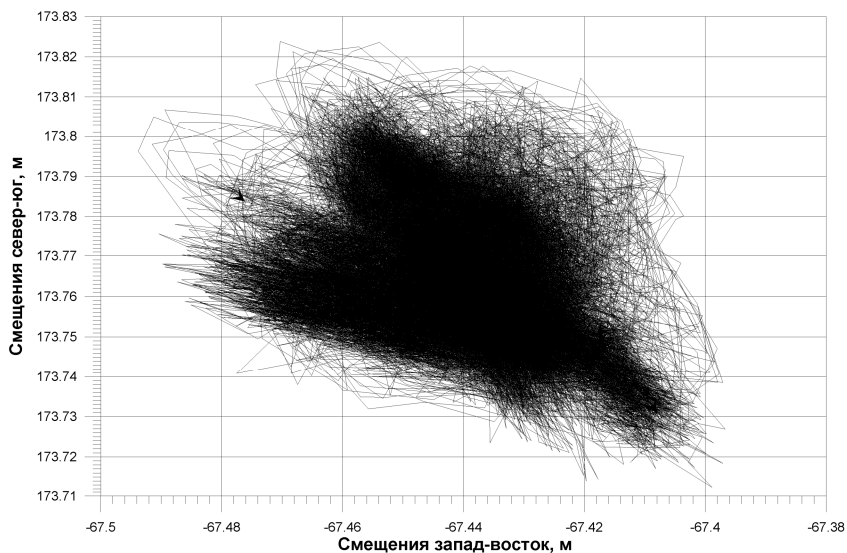


Рис. 12. Пример детального временного ряда смещений (антенна на высоте 75 м).  
Колебания с частотой 0,4 Гц



GNSS-измерения колебаний 100-м дымовой трубы  
дискретность измерений 0.2 сек, фрагмент мониторинга длительностью 5 сек

Рис. 13. Пример типичного роя горизонтальных смещений  
для антенны на высоте 75 м

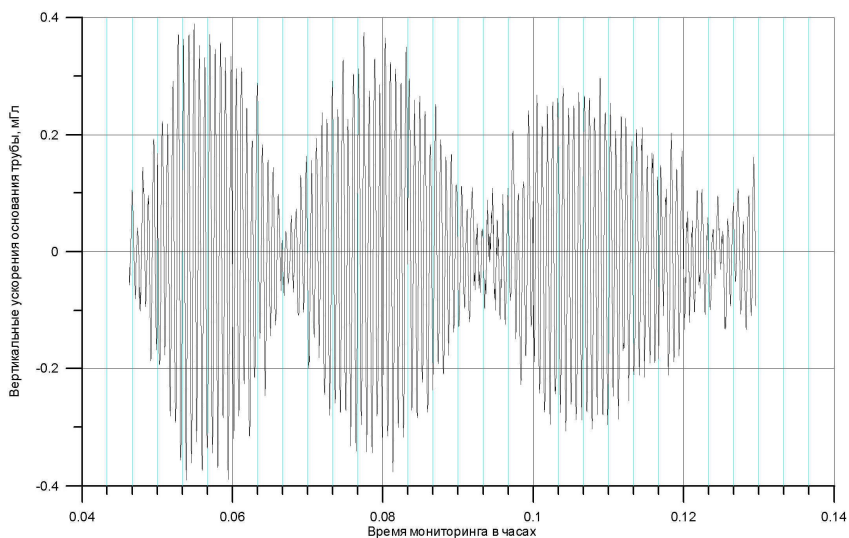


Рис. 14. Измеренные CG5-Autogрав вертикальные ускорения основания трубы  
дают частоту собственных колебаний 0,4 Гц, совпадающую с данными GNSS

### Выводы

1) Доказана техническая возможность качественного приема и обработки спутниковых сигналов на сложных стальных сооружениях башенного типа.

2) Методы мониторинга на основе GNSS-приемников являются наиболее точными и оптимальными технологически (всепогодными, практически любой длительности, обеспечивающими синхронность мониторинга отдельных точек).

3) Известные геодезические оптические, сейсмические, тензометрические, метеорологические и др. виды мониторинга могут дополнять GNSS-мониторинг и повышать надежность, а также достоверность оценки состояния высотных сооружений.

### Библиографический список

1. GAMIT/GLOBK Manual. T.A. Herring, R.W. King, S.C. McClusky. Massachusetts institute of technology. 2006, 182 p.
2. Topcon Positioning systems/GB-1000/ Руководство пользователя. Спутниковый GPS/Glonass приемник // Part Number 31-050402-01. 2004 TOPCON POSITIONING SYSTEMS, Inc. (перевод ЗАО ПРИН), 2004.
3. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. – М.: ОАО «ЦПП», 2008. 44 с.
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1984. 359с.
5. Коренев В.Г., Максимов Л.С., Сысоев В.И. Экспериментальные исследования колебаний Останкинской башни. Строительная механика и расчет сооружений. 1974, 2. С.36-40.
6. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: ИЛ, 1954. 648 с.