

На правах рукописи

Буренков Денис Борисович



Разработка методики геодезического контроля
изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов
с использованием API Laser Tracker 3

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Мурзинцев Петр Павлович.

Официальные оппоненты:

Столбов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», профессор кафедры геодезии;

Никитин Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (г. Барнаул).

Защита состоится 19 мая 2016 г. в 12.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте СГУГиТ. Материалы по защите диссертации размещены на сайте СГУГиТ:

<http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/burenkov-denis-borisovich/>

Автореферат разослан 25 марта 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Середович В. А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.02.2015. Формат 60×80 1/16.

Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основу современных ускорительно-накопительных комплексов (УНК) заряженных частиц составляет уникальное физическое оборудование, объединяющее различные по форме магнитные элементы, от изготовления и высокоточной установки которых зависит эффективность работы всего УНК. Магнитные элементы могут быть успешно изготовлены только при высокоточном геодезическом контроле, выполняющемся на всех этапах их производства. С широким внедрением в производство мобильных координатно-измерительных систем, лазерных технологий, 3D-моделирования, с постоянно растущими требованиями к точности установки магнитных элементов важными становятся вопросы определения реальной точности современных геодезических приборов, выявления возможности использования лазерных трекеров в качестве универсальных геодезических приборов на ускорительных комплексах. Актуальной научно-технической задачей является разработка методики геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов с помощью лазерных трекеров. Для эффективного использования геодезических приборов и оборудования возникает необходимость в разработке новых методик, методических рекомендаций, технологических решений, существенно повышающих точность геодезических измерений с одновременным сокращением временных затрат.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие инженерной геодезии при строительстве и эксплуатации уникальных сооружений внесли Асташенков Г. Г., Большаков В. Д., Васютинский И. Ю., Ключин Е. Б., Конусов В. Г., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Новак В. Е., Пимшин Ю. И., Пискунов М. Е., Рязанцев Г. Е., Столбов Ю. В., Уставич Г. А., Шторм В. В., Ямбаев Х. К.

Важную роль в разработке специальных методик геодезических измерений на ускорительно-накопительных комплексах сыграли исследования отече-

ственных специалистов: Пупкова Ю. А., Левашова Ю. И., Бокова М. А., Лавриченко Е. Д., Кирочкина Ю. И.

С появлением новых приборов возникла необходимость в разработке методических рекомендаций по проведению геодезических работ на ускорительных комплексах. Актуализировалась проблема разработки методических и технологических решений для геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов ускорительных комплексов.

Цели и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключалась в разработке и реализации методики геодезического контроля процессов изготовления и периодической юстировки магнитных элементов ускорительных комплексов при помощи API Laser Tracker 3, с определением его реальных точностных характеристик и возможностью построения 3D-моделей.

Для достижения поставленной цели решены следующие *основные задачи*:

– выполнить анализ технологий и технических средств для геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов;

– провести исследования по определению точности геодезических измерений лазерного трекера API Laser Tracker 3;

– разработать и реализовать методику геодезического обеспечения изготовления магнитных элементов УНК и процесса юстировки в проектное положение ускорительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3 на примере комплекса встречных электронно-позитронных пучков (ВЭПП-2000);

– разработать и внедрить в производственный процесс алгоритмы и пакет прикладных программ для обработки результатов геодезических измерений и 3D-моделирования.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

– разработана технологическая схема и методические решения для обеспечения геодезического контроля при проведении магнитных измерений с ис-

пользованием API Laser Tracker 3, позволившие определить магнитную ось дипольного магнита относительно внешних геодезических знаков;

– разработана и реализована методика юстировки ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 при помощи API Laser Tracker 3;

– на основе выполненных исследований по определению реальной точности измерений API Laser Tracker 3 разработаны методические рекомендации и технологические решения для выполнения работ на ускорительных комплексах, устранены ошибки работы внутреннего электронного уровня прибора.

Основным отличием разработанных методик является использование на ускорительных комплексах нового средства измерения API Laser Tracker 3, позволившего заменить целый парк оборудования, с помощью которого координаты определялись для каждой оси отдельно, установка на комплексе происходила также по каждой оси с применением своей оснастки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в оптимизации пространственно-временной достаточности геодезических измерений при контроле изготовления и установки магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов.

Практическое значение выполненных исследований заключается во внедрении разработанной методики и технологических решений в научно-производственный процесс геодезического контроля изготовления уникального оборудования для отечественных и зарубежных УНК, создаваемых Институтом ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). При этом эффективно решается научно-техническая задача с существенным повышением скорости проведения работ, точности и надёжности геодезического обеспечения.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы цифрового моделирования, метод наименьших квадратов, линейная алгебра.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты и способ исследования точности работы API Laser Tracker 3;

– технологические решения по обеспечению геодезического контроля изготовления магнитных элементов ускорительных комплексов, повышающие точность и информативность проводимых измерений;

– методические решения для геодезического обеспечения ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 позволили обеспечить требуемую точность и существенно сократить время проведения геодезических измерений и как следствие – простой комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на следующих конференциях:

– на VI Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2010», (19–29 апреля 2010 г., г. Новосибирск);

– на VII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2011», (27–29 апреля 2011 г., г. Новосибирск);

– на VIII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2012», (17–19 апреля 2012 г., г. Новосибирск).

Разработанная методика применена при выполнении работ по контрактам: № 26165 от 23 мая 2007 г. с IHI Co Ltd, Япония (дипольные магниты для медицинского центра ионной терапии в Gunma University); № 159-315 от 07 мая 2010 г. с Брукгейвенской Национальной Лабораторией, США (изготовление бустера для комплекса NSLS-II); № TD-100410-d-TZI от 09 ноября 2010 г. с EBG MedAustron, Австрия (24 дипольных магнита синхротрона МВН-С для ионного центра терапии рака); № 120406 от 23 июля 2012 г. с EBG MedAustron, Австрия (13 дипольных магнита каналов высокой энергии МВН-Е для ионного центра терапии рака) – и другим контрактам. Методика геодезического контроля ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 используется в ИЯФ СО РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дано обоснование актуальности темы диссертации и обозначена цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В *первом разделе* рассматривается история развития геодезического обеспечения на ускорительно-накопительных комплексах.

На примере ускорительно-накопительных комплексов: встречных электронно-позитронных пучков (ВЭПП-4м, Новосибирск), большого адронного коллайдера (LHC, CERN), национального источника синхротронного излучения (NSLS-II, США) – рассмотрены требования к точности позиционирования магнитных элементов.

Показаны особенности эволюции геодезического оборудования, применяемого на ускорительных комплексах.

Второй раздел посвящен исследованиям точности геодезических измерений с использованием API Laser Tracker 3.

Точность сборки оборудования ускорительных комплексов с каждым годом повышается, практически вплотную подходя к паспортным точностям геодезического оборудования. Для проведения измерений на пределе точности требуется выполнить доскональное исследование приборов, разработать новые методики работы с ними.

API Laser Tracker 3 (рисунок 1) – высокоточный измерительный прибор, основанный на принципе слежения за специальным уголковым отражателем с помощью лазерного луча. При попадании лазерного



Рисунок 1 – Общий вид API Laser Tracker 3

луча, испускаемого прибором, в центр уголкового отражателя, он возвращается обратно в объектив прибора, а далее – на приемный датчик дальномера. С учетом двух углов и расстояния вычисляются текущие пространственные координаты отражателя. API Laser Tracker 3 оснащен двумя типами дальномеров: интерферометром (режим работы IFM) и абсолютным дальномером (режим работы ADM). Их основное отличие состоит в том, что абсолютный дальномер измеряет абсолютное расстояние между отражателем и прибором, а интерферометр, в свою очередь, измеряет изменение расстояния от базового значения. При производстве геодезических измерений вся информация собирается и обрабатывается на персональном компьютере в программном обеспечении (ПО) Spatial Analyzer. По каждому проведенному измерению сохраняются данные о времени проведения измерений, пространственных координатах, температуре, давлении, точности измерений, используемой оснастке и ряд других параметров.

В диссертационной работе приведено сравнение мобильных координатно-измерительных систем, рассмотрены особенности их внутреннего устройства, влияющие на точность геодезических измерений.

Выполнен ряд экспериментальных исследований для определения точностных характеристик API Laser Tracker 3. На основании выполненных исследований дана оценка возможности использования прибора на ускорительных комплексах.

Для оценивания влияния прогрева API Laser Tracker 3 на точность геодезических измерений было проведено следующее исследование. Лазерный трекер был установлен на геодезический знак компаратора ИЯФ СО РАН. Геодезический знак, для которого определялись координаты, находился на расстоянии 19,647 м. В течение 4,5 ч, с периодичностью 1 мин, проводилось определение координат геодезического знака относительно трекера. Во время одного измерения прибор выполняет 50 отсчетов. Таким образом, координаты вычислялись по формулам:

$$X_{\text{изм}} = \frac{\sum (\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot S)}{50}, \quad (1)$$

$$Y_{\text{изм}} = \frac{\sum (\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot S)}{50}, \quad (2)$$

$$Z_{\text{изм}} = \frac{\sum (\cos \beta \cdot S)}{50}, \quad (3)$$

Средняя квадратическая погрешность одного измерения для расстояния 19,642 м составила 0,037 мм и вычислялась по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (((\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot S)_i - X_{\text{изм}})^2 + ((\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot S)_i - Y_{\text{изм}})^2 + ((\cos \beta \cdot S)_i - Z_{\text{изм}})^2)}{50}}. \quad (4)$$

При проведении геодезических измерений в помещении отсутствовали люди, API Laser Tracker 3 работал в автоматическом режиме. Температура за весь промежуток времени оставалась неизменной. Чтобы избежать вертикального температурного градиента, свет в помещении был выключен. Произведено семь циклов измерений. Характерный фрагмент исследований представлен на рисунке 2.

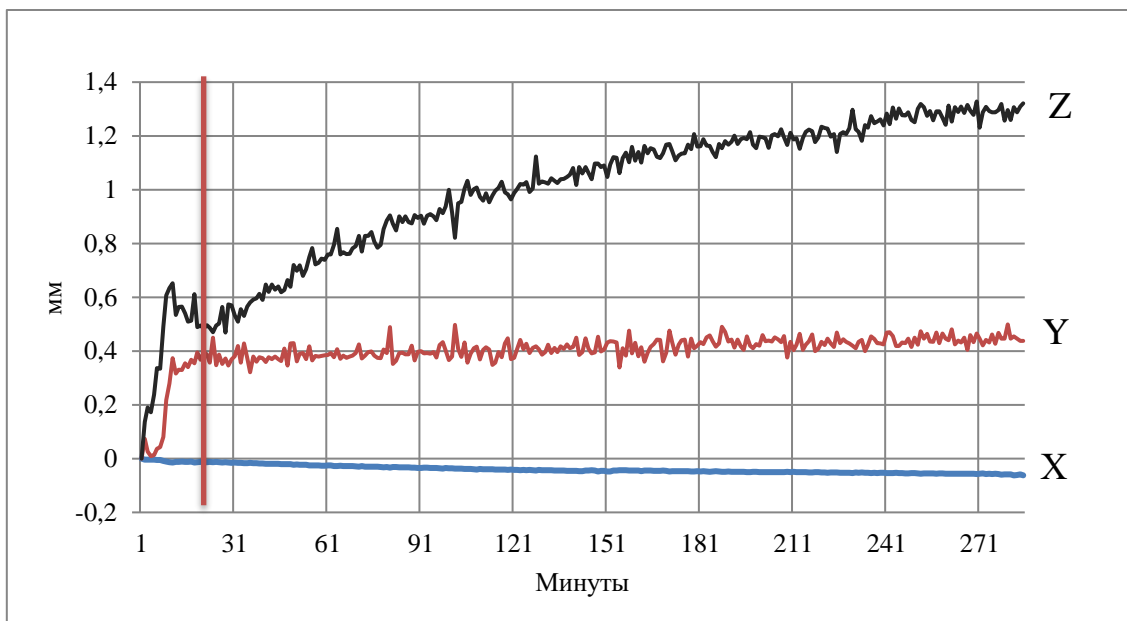


Рисунок 2 – Изменение координат X, Y, Z со временем

Результаты исследований показывают, что для проведения высокоточных работ после стандартного прогрева API Laser Tracker 3 требуется выдерживать минимум 15–20 минут и только после этого начинать калибровку и геодезиче-

ские измерения. Целесообразно работы выполнять в короткий промежуток времени, делать контрольные измерения на опорные геодезические знаки, при необходимости производить повторные привязки к опорной геодезической сети.

Исследована точность линейных измерений. Проведена серия измерений на компараторе ИЯФ СО РАН для определения относительной погрешности API Laser Tracker 3. В качестве эталона взят интерферометр Hewlett-Packard 5529A.

Для совместных измерений длин линий API Laser Tracker 3 установили на противоположном конце направляющей компаратора в створ с интерферометром HP 5529A (рисунок 3).

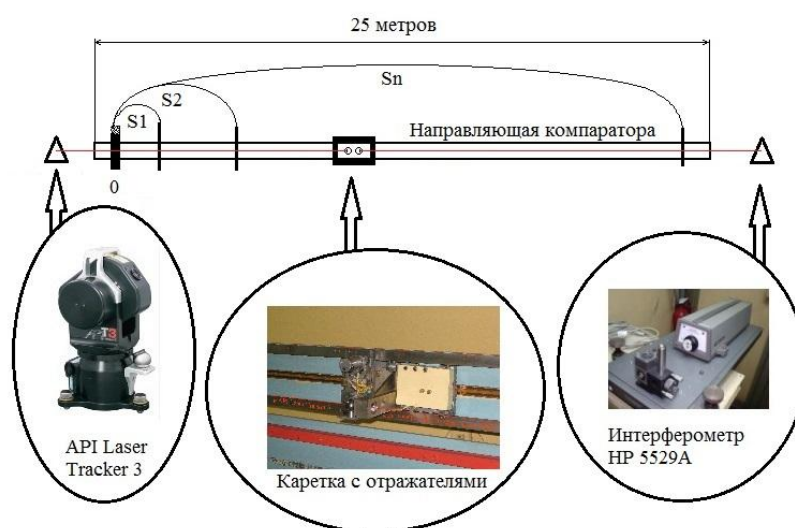


Рисунок 3 – Схема расположения оборудования на компараторе ИЯФ СО РАН

На каретку, которая перемещается по направляющей, с обратной стороны от призмы интерферометра установлен отражатель трекера.

Каретка с отражателями перемещалась по команде оператора с помощью электропривода, размещенного на ней. Измерения выполнялись одновременно двумя приборами после остановки каретки. Для контроля в нескольких циклах измерения выполнялись при прямом и обратном ходе каретки. За начало отсчета брались координаты положения каретки, ближайшее к API Laser Tracker 3. Фрагмент исследований приведен на рисунке 4.

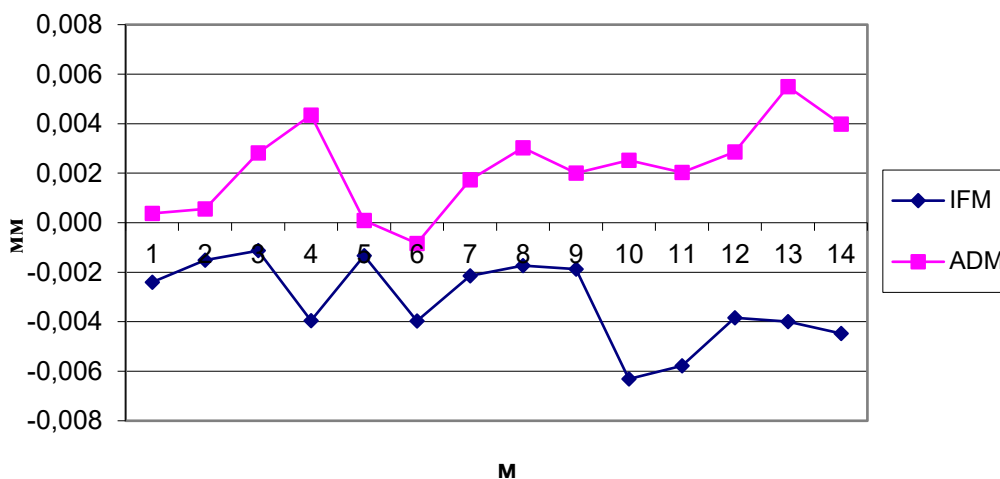


Рисунок 4 – Разность расстояний, измеренных API Laser Tracker 3 в двух режимах с интерферометром HP 5529A

На основе произведенных измерений можно сделать вывод: интерферометр и абсолютный дальномер API Laser Tracker 3 соответствуют техническим характеристикам производителя. Измерения предпочтительнее производить в режиме IFM для достижения лучшей точности.

В следующем исследовании оценивалась точность работы трекера от горизонта. Согласно приведенным техническим характеристикам, точность горизонтирования прибора по внутреннему электронному уровню составляет $\pm 2''$. Электронный уровень работает в диапазоне $\pm 1^\circ$. При выполнении работ с помощью API Laser Tracker 3 на комплексах ИЯФ СО РАН была замечена ошибка определения превышений между измеренными точками с разных установок прибора. Эта ошибка никак не укладывалась в величину $\pm 2''$. Чувствительности уровня, закрепленного на штативе, оказалось недостаточно, хотя он обеспечивал необходимую работу электронного уровня (компенсатора), диапазон которого контролировался программным обеспечением.

Для определения величины этой ошибки был поставлен следующий эксперимент. API Laser Tracker 3 был установлен на экзаменатор, который, в свою очередь, был установлен на жестком основании между двумя геодезическими

знаками, закрепленными на компараторе ИЯФ. Также дополнительно был изготовлен уровень с ценой деления $6'$ и закреплен на оси вращения API Laser Tracker 3 (рисунок 5).

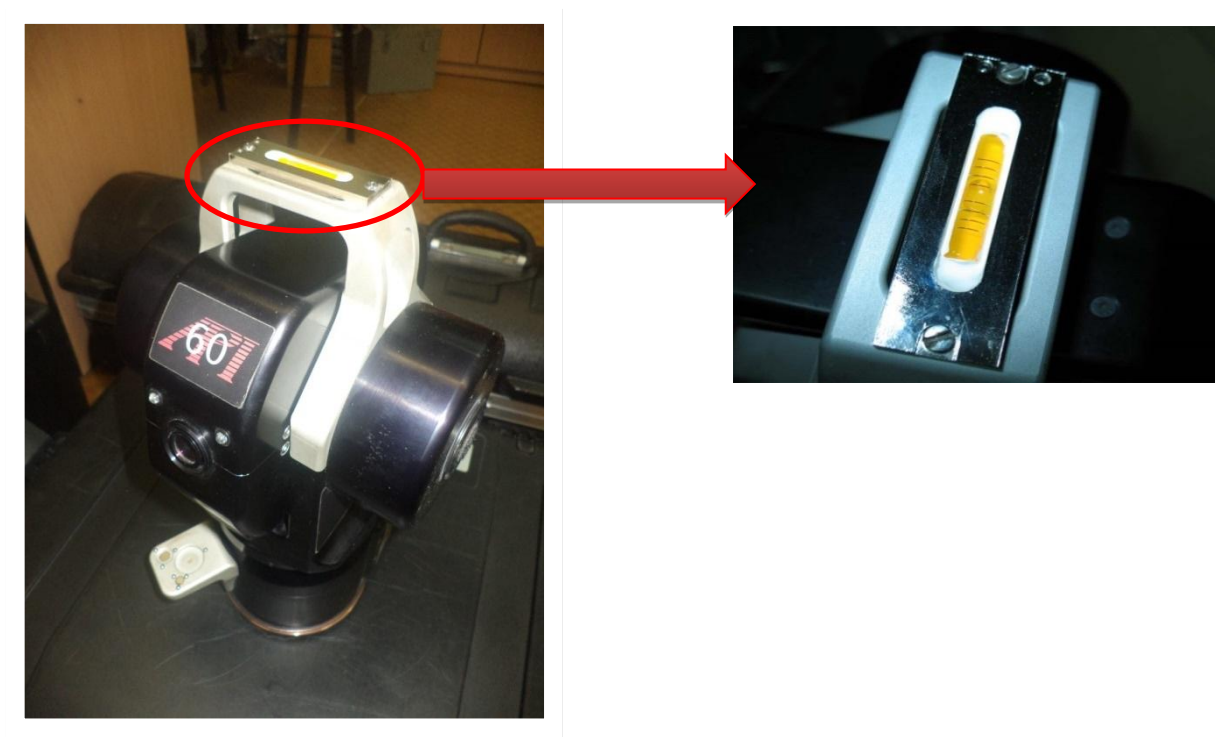


Рисунок 5 – Изготовленный уровень на корпусе прибора

Методика поверки внутреннего электронного уровня прибора состоит в следующем. Экзаменатор был установлен параллельно измеряемой линии. Угол наклона экзаменатора измерялся при помощи оптического квадранта. На компараторе установлены два геодезических знака на расстоянии 16,5 м друг от друга. API Laser Tracker 3 расположен на экзаменаторе между ними. «Домашняя точка» API Laser Tracker 3 направлена перпендикулярно измеряемой линии, соответственно ось X системы координат приведенного к уровню API Laser Tracker 3 перпендикулярна измеряемой линии. Был проверен диапазон наклона оси Y на $\pm 1^\circ$ с шагом $5'$, при этом ось X была горизонтальна, установлена по уровню, закрепленному на оси вращения API Laser Tracker 3. Наклон осуществлялся только по одной оси Y ! Перед измерением были выполнены необходимые калибровки API Laser Tracker 3.

В начале измерений API Laser Tracker 3 был установлен на экзаменаторе под углом минус 60', приведен к электронному уровню, выполнено измерение на контрольные точки (трижды), вычислено превышение. Далее угол наклона экзаменатора изменялся на 5', прибор приводился к электронному уровню, измерение выполнялось три раза. Был проверен диапазон от минус 60' до плюс 60'. Результат измерений представлен на графике (рисунок 6). Среднее квадратическое отклонение от трендовой прямой составляет 0,038 мм. Превышение между контрольными точками 0,125 мм измерено при помощи нивелира Ni007, вычтено из превышений, измеренных API Laser Tracker 3.

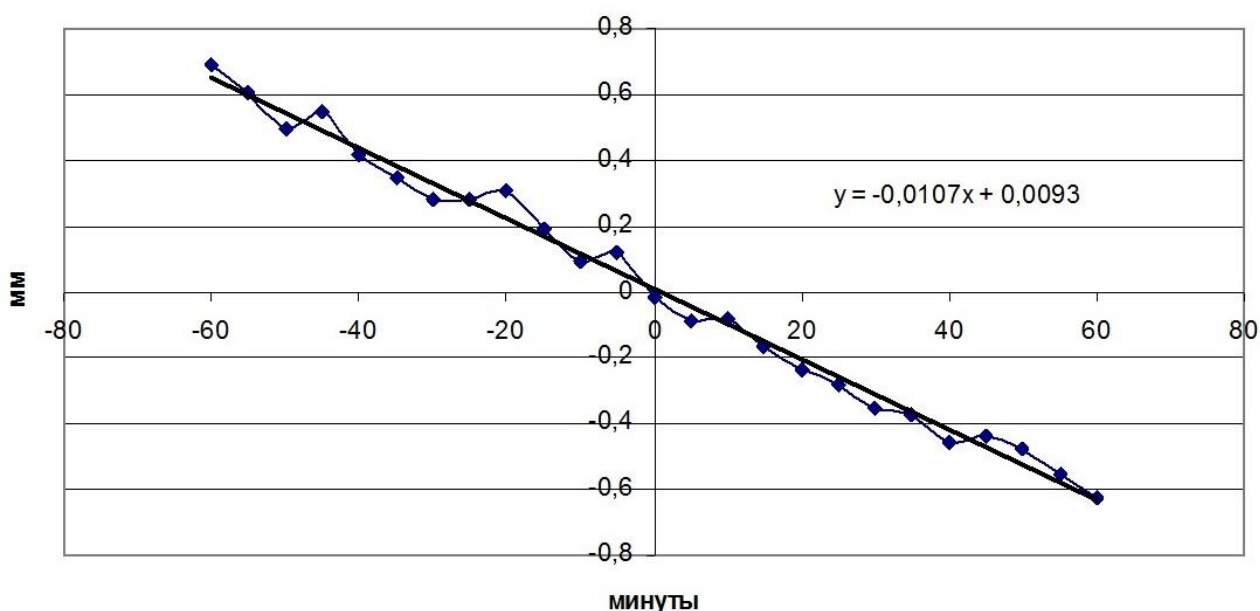


Рисунок 6 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 с наклоном экзаменатора по оси X

Выполнен повторный цикл измерений с повторным включением и инициализацией инструмента. «Домашняя точка» была развернута на 90°. Результат представлен на графике (рисунок 7). Среднее квадратическое отклонение от трендовой прямой составляет 0,035 мм. Превышение между контрольными точками 0,151 мм измерено при помощи нивелира Ni007 и также вычтено из превышений, измеренных API Laser Tracker 3.

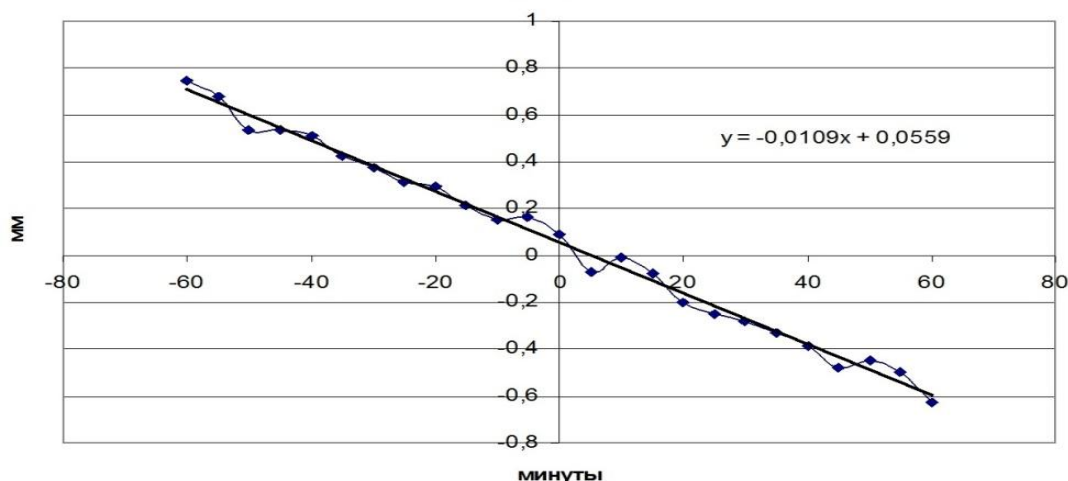


Рисунок 7 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 при наклоне экзаменатора по оси Y

Средняя квадратическая погрешность одного измерения API Laser Tracker 3 составляет 0,011 мм. Величина ошибки измерения превышения, представленная на рисунках 6, 7, показывает, что прибор имеет перекомпенсацию по внутреннему уровню (компенсатору) порядка 9"–10" по обеим осям. Это больше заявленной точности почти в пять раз!

Разработчик API Laser Tracker 3 (американская фирма API) была поставлена в известность о результатах исследований. Со стороны фирмы было предпринято несколько попыток исправить ситуацию. В конечном итоге выяснилось, что данная ошибка присутствует во всех приборах этой серии. Исправить ее производитель не смог. Из инструкции прибора была убрана информация о диапазоне работы внутреннего электронного уровня.

Сотрудниками ИЯФ СО РАН исследована точность установки прибора по изготовленному цилиндрическому уровню, размещенному на оси вращения API Laser Tracker 3. С помощью экзаменатора API Laser Tracker 3 был установлен по уровню, изготовленному и закрепленному на его оси вращения. Затем API Laser Tracker 3 устанавливается по внутреннему электронному уровню, производится измерение на контрольные точки (трижды), после этого API Laser Tracker 3 случайным образом наклоняется, и процедура установки и измерения

повторяется. Было сделано по 10 повторных установок прибора для трех разных расстояний:

- для расстояния 4,137 м, $\sigma = 0,009$ мм;
- для расстояния 14,875 м, $\sigma = 0,037$ мм;
- для расстояния 24,556 м, $\sigma = 0,051$ мм.

Выполненные исследования показали, что для корректного использования прибора необходимо иметь уровень приблизительно 6', закрепленный на оси вращения API Laser Tracker 3. Это позволяет приводить результаты геодезических измерений к абсолютному горизонту. Модернизация API Laser Tracker 3 позволила достичь точности определения отклонений от горизонта 0,5", что в четыре раза лучше точности, заявленной фирмой-изготовителем.

Третий раздел рассматривает вопросы паспортизации магнитных элементов ускорительных комплексов. Разработаны методики измерений и паспортизации геодезических знаков на магнитных элементах при помощи API Laser Tracker 3.

Автор предлагает использовать в качестве центра геодезического знака центр отражателя API Laser Tracker 3, а не точку пересечения плоскости «железа» магнита с осью посадочного цилиндра геодезического знака. В этом случае полученные координаты геодезического знака находятся не на плоскости физического железа магнитного элемента, а над ней на расстоянии 25 мм (отражатель плюс оснастка). Исключается ошибка при пересчете за неперпендикулярность отверстия геодезического знака к базовой плоскости магнита.

При использовании методики с применением API Laser Tracker 3 отпала необходимость в изготовлении и компарировании специальных шаблонов. Все три координаты определяются одновременно. Не требуется использовать поверочные плиты и выставлять измеряемый элемент по уровню. Появилась возможность оценить точность изготовления отдельных частей магнитного элемента (например, полюсов) и точность сборки, ранее это было либо невозможно средствами машиностроения, либо представляло собой долговременный и трудоемкий процесс.

Одной из сложных задач оказалось определение положения центров отражателей, расположенных на каретке с датчиками Холла. Для геодезического обеспечения производства магнитных измерений автором разработан способ привязки центров отражателей к системе координат каретки (рисунок 8).

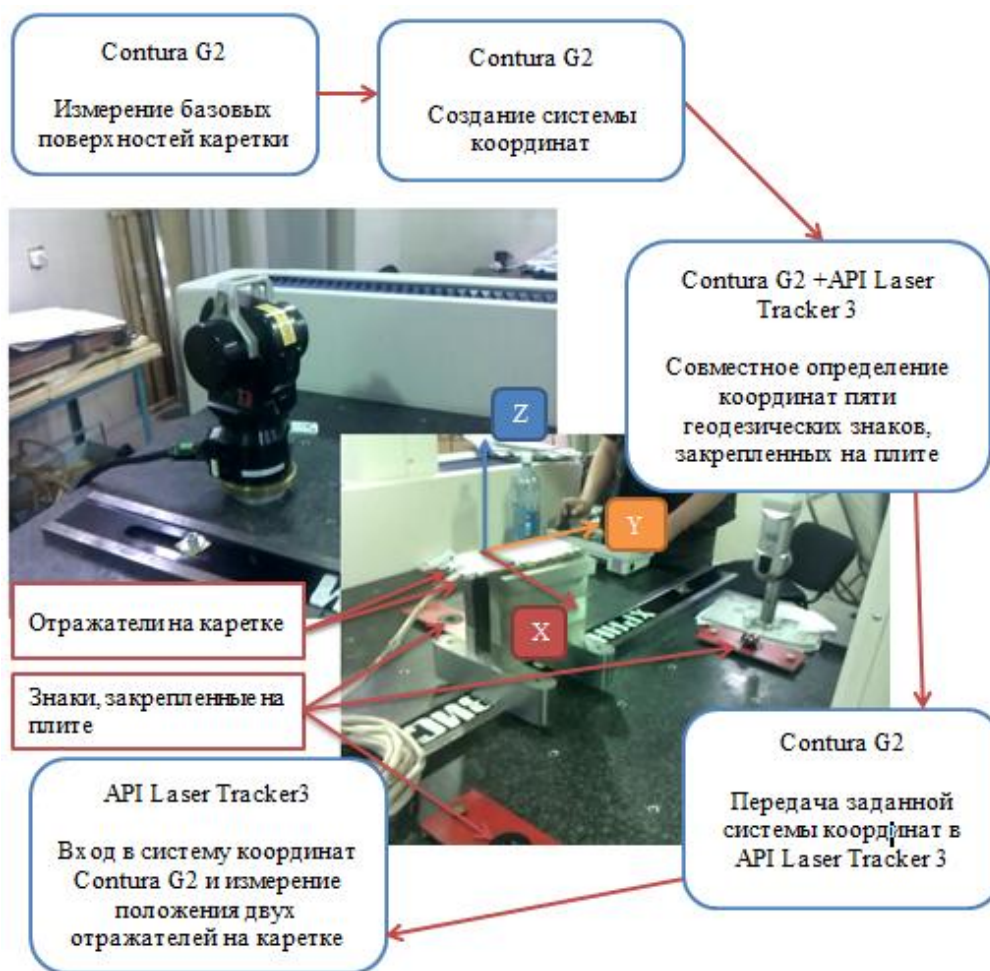


Рисунок 8 – Схема привязки отражателей к системе координат каретки

Из-за маленьких размеров призма отражателя конструктивно размещена в пластиковом корпусе, который не имеет привязки к центру отражателя. То есть отражатель пригоден только для проведения относительных измерений. В данном случае требовались абсолютные координаты центров отражателей в системе координат каретки. Сама же каретка не имеет баз, пригодных для проведения измерений API Laser Tracker 3. Привязку удалось выполнить при помощи API Laser Tracker 3 и координатно-измерительной машины Contura G2 через

внешние переходные геодезические знаки, положение которых эти устройства определяют одновременно.

В отличие от ранее применяемого способа геодезического контроля, позволяющего определять только линейное перемещение каретки, разработанный способ позволяет определить траекторию пространственного движения каретки. По результатам диссертационного исследования разработана технологическая схема геодезического обеспечения контроля изготовления дипольных магнитных элементов ускорительных комплексов (рисунок 9).

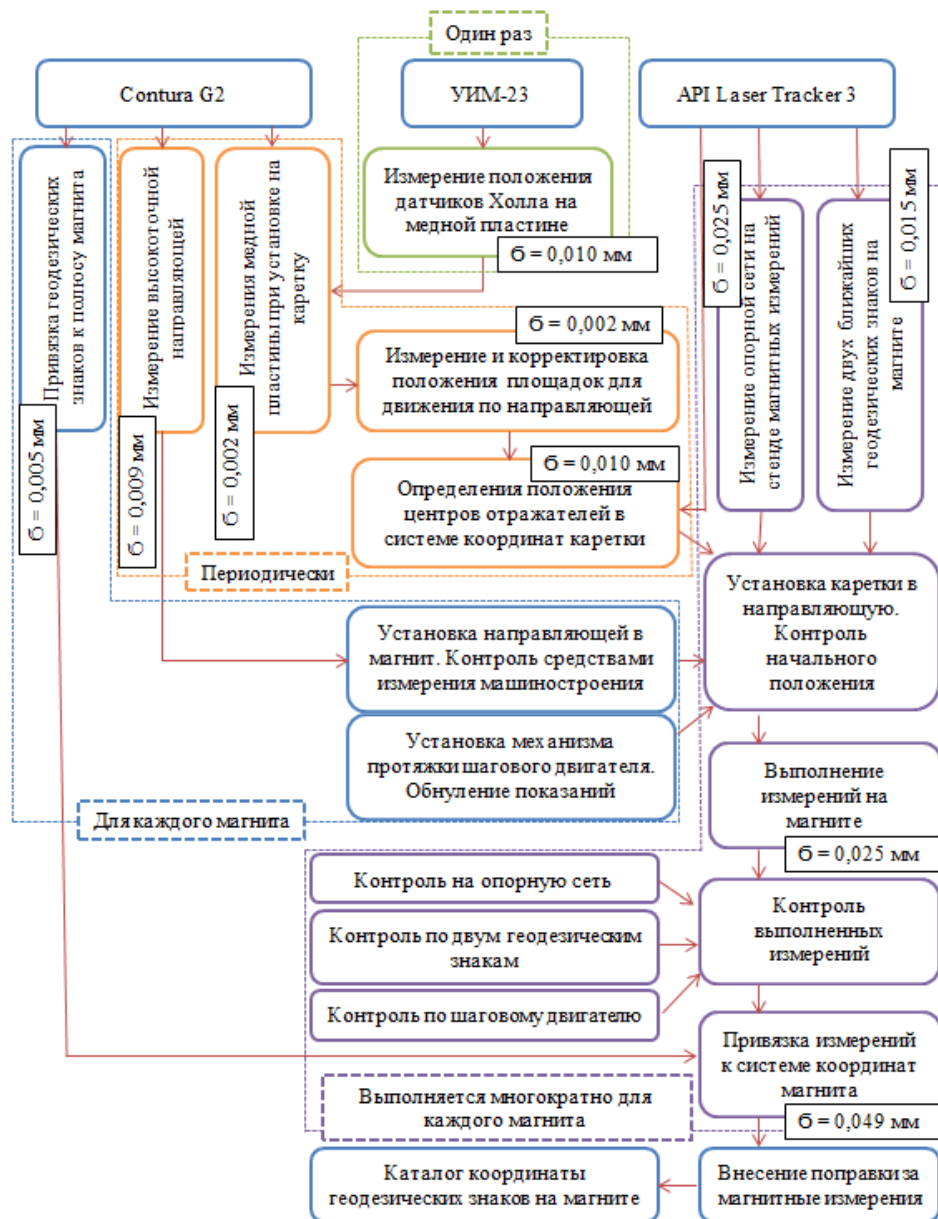


Рисунок 9 – Технологическая схема геодезического обеспечения контроля изготовления дипольных магнитов

Разработанная методика геодезического обеспечения доказала свою эффективность и сейчас широко применяется для паспортизации магнитных элементов в ИЯФ СО РАН.

Одна из задач диссертационного исследования заключалась в разработке методики периодической установки ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000. Для периодической установки технологического оборудования комплекса в проектное положение используется API Laser Tracker 3 и нивелир Ni007. Схема размещения станций трекера на комплексе ВЭПП-2000 представлена на рисунке 10.

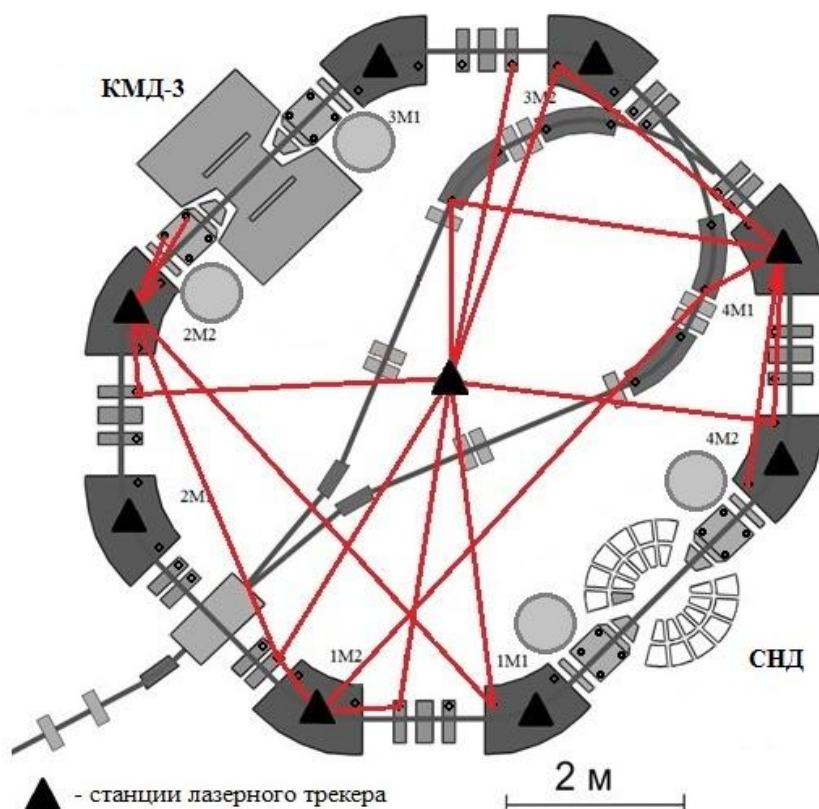


Рисунок 10 - Схема станций трекера на комплексе ВЭПП-2000

Для установки всего оборудования требуется выполнить девять станций API Laser Tracker 3 и пять станций с нивелиром Ni007. Нивелир Ni007 необходим только для комплекса ВЭПП-2000 из-за конструктивных особенностей геодезиче-

ских знаков на дипольных магнитах. Предлагаемая автором методика установки ускорительных комплексов масштаба ВЭПП-2000 представлена на рисунке 11.

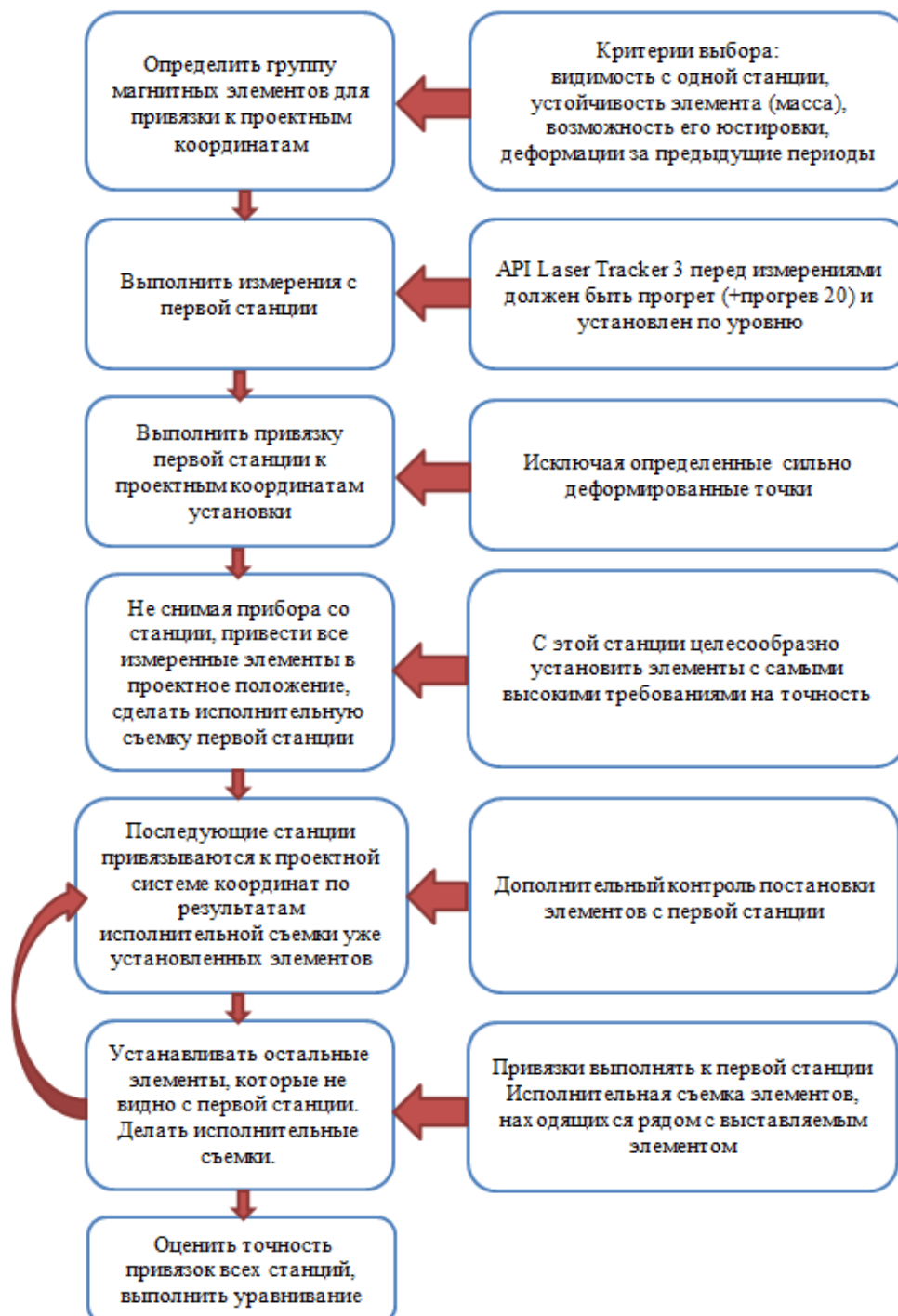


Рисунок 11 – Предлагаемая автором методика установки накопительных комплексов масштаба ВЭПП-2000 в проектное положение

Для юстировки комплекса ВЭПП-2000 был создан каталог координат в программном обеспечении Spatial Analyzer. В него внесены координаты элементов комплекса, для которых требуется точная установка. Важно отметить, что координаты внесены с учетом оснастки (offset) лазерного трекера, то есть закоординированы точки, которые лежат над поверхностью магнита на высоте 25,4 мм (использован дюймовый набор оснастки). После прогрева трекера необходимо выполнить 20-минутный дополнительный прогрев и только после этого начинать делать калибровки и измерения. Все измерения и юстировку элементов по возможности выполнять в максимально короткий промежуток времени. API Laser Tracker 3 должен быть установлен по внутреннему электронному уровню.

С первой станции API Laser Tracker 3 определяется пространственное положение всех видимых геодезических знаков на элементах ускорительного комплекса. По результатам измерений определяются координаты геодезических знаков в локальной системе координат API Laser Tracker 3. Полученные координаты элементов комплекса накладываются на проектные координаты геодезических знаков каталога координат, так чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна. После этого станция прибора и все выполненные измерения «привязываются» в проектную систему координат. Средняя квадратическая погрешность привязки определенных координат к проектным координатам зависит от величины реализовавшихся деформаций на комплексе ВЭПП-2000 и может составлять несколько десятых долей миллиметра в год. После выполнения привязки API Laser Tracker 3 устанавливается режим, показывающий отклонение от проектных величин. Магнитные элементы комплекса при помощи юстировочных винтов устанавливаются в проектное положение согласно данным каталога проектных координат. После установки всех элементов с первой станции производится исполнительная съемка. Следующие четыре станции делаются на дипольных магнитах 1M2, 2M1, 3M2, 4M1, с них устанавливаются оставшиеся четыре дипольных магнита, знаки которых не видны из центра. По-

сле установки этих магнитов выполняется исполнительная съемка как самих дипольных магнитов, так и близлежащих к ним элементов комплекса. Максимальная средняя квадратическая погрешность определения положения геодезических знаков на магнитных элементах ВЭПП-2000 с любой точки комплекса 0,07 мм, получена по результатам многочисленных измерений API Laser Tracker 3. Для привязки последующих станций используются результаты исполнительной съемки первой станции. Последние четыре станции нужны для выставки четырех сверхпроводящих соленоидов. Привязка также осуществляется на уже установленные элементы, по возможности, на элементы, установленные с первой станции. Порядок исполнительной съемки тот же, что и для всех станций после первой. Выполняется съемка установленного элемента и всех связанных с ним элементов. Общая средняя квадратическая погрешность уравненных координат всех магнитных элементов относительно проектных координат не должна превышать 0,2 мм.

Разработанная методика с использованием API Laser Tracker 3 позволила значительно увеличить скорость проведения работ, повысить точность и сократить время простоя комплекса с 10–15 дней до 3–4. Данная методика подходит как для периодического геодезического контроля и установки оборудования всего комплекса, так и для выставки его отдельных частей после разборки или ремонта. Наблюдается незначительное смещение комплекса как целого. Величина смещения составляет 0,1–0,2 мм в год, что тоже возможно периодически (раз в несколько лет) корректировать, привязывая комплекс ВЭПП-2000 к комплексу БЭП, с которого поступает пучок частиц.

В *четвертом разделе* представлены алгоритмы и пакет программ, разработанных автором диссертации (рисунок 12). Представлены программы для обработки результатов измерений на ускорительных комплексах, таких как ВЭПП-4м. Разработан и реализован алгоритм для получения 3D-моделей городов, населенных пунктов, со всеми коммуникациями, включая подземные. Отличием от существующих является высокая скорость обработки данных и возмож-

ность автоматического построения 3D-моделей из формата MID/MIF. Часть пакета прикладных программ используется на производстве ИЯФ СО РАН, часть внедрена в учебный процесс СГУГиТ, СГУПС. На один программный продукт получено свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 11783.

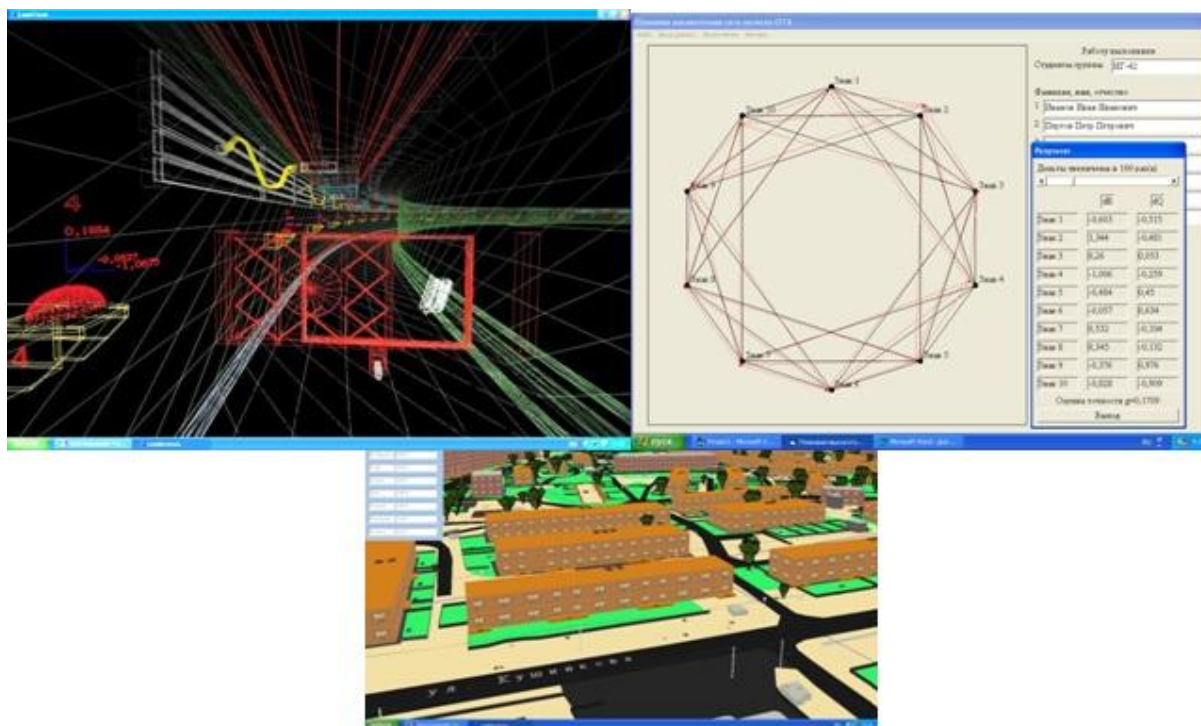


Рисунок 12 – Иллюстрация некоторых возможностей пакета прикладных программ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель достигнута. Итоги выполненного исследования:

- показана актуальность разработки методик для применения лазерных трекеров на ускорительных комплексах, отличающихся от производственных методик применения этих приборов;

- в результате выполненных исследований установлено, что для повышения точности геодезических измерений установленный производителем прогресс API Laser Tracker 3 должен быть увеличен как минимум на 15–20 минут;

– исследование работы внутреннего электронного уровня выявило некорректную установку API Laser Tracker 3 в горизонт. Точность, заявленная фирмой изготовителем (2"), в реальности оказалась грубее в пять раз. Выявлена систематическая ошибка калибровки электронного уровня. Проведена модернизация лазерного трекера, которая позволила достичь точности определения отклонений от горизонта 0,5";

– разработана методика работы с лазерным трекером на ускорителях в процессах: изготовления магнитных элементов, сопровождения магнитных измерений, периодической юстировки в проектное положение при последующей эксплуатации комплексов. Заменены многие трудоемкие процессы с применением механических средств измерений. Методика внедрена в производственный процесс Института ядерной физики СО РАН, использовалась на комплексах ВЭПП-4м, ВЭПП-2000 и при производстве магнитных элементов ускорительных комплексов в контрактах: № 26165 от 23 мая 2007 г. с INI Co Ltd, Япония (дипольные магниты для медицинского центра ионной терапии в Gunma University); № 159-315 от 07 мая 2010 г. с Брукхейвенской Национальной Лабораторией, США (изготовление бустера для комплекса NSLS-II); № TD-100410-d-TZI от 09 ноября 2010 г. с EBG MedAustron, Австрия (24 дипольных магнита синхротрона MBH-C, для ионного центра терапии рака); № 120406 от 23 июля 2012 г. с EBG MedAustron, Австрия (13 дипольных магнитов каналов высокой энергии MBH-E для ионного центра терапии рака);

– разработанные алгоритмы реализованы в пакете прикладных программ для обработки результатов геодезических измерений и построения 3D-моделей.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при создании уникального технологического оборудования для российских и зарубежных ускорительных комплексов. Перспективы научных исследований заключаются в том, что они могут быть продолжены в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг».

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Геодезический мониторинг подземных коммуникаций с применением 3D-моделирования [Текст] / И. О. Биндер, Д. Б. Буренков, Г. А. Гринь, П. П. Мурзинцев // Геодезия и картография. – 2011. – № 4. – С. 5–9.

2 Исследование точностных характеристик внутреннего электронного уровня API Laser Tracker 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 6. – С. 25–28.

3 Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.

4 Исследование точности измерения превышений лазерным трекером API Tracker 3 в ИЯФ СО РАН [Текст] / М. А. Боков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 1. – С. 119–125.

5 Исследование точностных характеристик дальномеров API Laser Tracker 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 9–12.

6 О геодезическом сопровождении Booster NSLS-II Брукхейвенской национальной лаборатории министерства энергетики США [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 183–188.