

На правах рукописи

Сердаков Леонид Евгеньевич



Разработка методики геодезического обеспечения
для монтажа технологического оборудования источников
синхротронного излучения

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2020

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:

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Щербаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой инженерной геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 24 ноября 2020 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при 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 ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/serdakov-leonid-evgenevich/>

Автореферат разослан 1 октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евгений Ильич Аврунев

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 21.09.2020. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 117.

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

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. 1 декабря 2016 г. Указом Президента Российской Федерации № 642 утверждена стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, которой предусмотрена поддержка создания и использования уникальных научных установок класса «Мегасайенс» – крупных исследовательских инфраструктур на территории России. Стратегия подразумевает участие российских ученых и исследовательских групп в международных проектах, обеспечивающих доступ к новым компетенциям и ресурсам организации, исходя из национальных интересов Российской Федерации.

В Российской Федерации строительство крупных ускорительных комплексов не осуществлялось уже около 25 лет. Поэтому для реализации стратегии научно-технологического развития необходимо разработать новые, более эффективные подходы к проектированию, контролю и эксплуатации таких уникальных инженерных сооружений и технологических комплексов. Следовательно, для реализации этих масштабных проектов необходимо разработать методику соответствующего геодезического обеспечения.

Ключевым аспектом для геодезического обеспечения проектирования и строительства таких комплексов является создание специальной геодезической сети и выполнение работ для установки технологического оборудования в проектное положение.

Допуски на установку элементов структуры современных ускорителей находятся в диапазоне 0,05–0,1 мм. Данные требования находятся на границе возможной достижимой точности геодезических измерений современных лазерных трекеров. Кроме того, при создании УНК в уже существующих тоннелях и зданиях возникают задачи по модернизации или созданию новой специальной геодезической сети (Бустер коллайдера NICA в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна; Европейский синхротрон (ESRF), г. Гренобль, Франция; Большой Адронный Коллайдер (LHC) , г. Женева, Швейцария).

Поэтому разработка методики геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения четвертого поколения является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Исследованиями построений геодезических сетей для уникальных инженерных сооружений занимались такие специалисты, как Боков М. А., Горелов В. А., Рязанцев Г. Е., Лебедев Н. Н., Марфенко С. В., Новак В. Е., Конусов В. Г., Ямбаев Х. К., Пупков Ю. А. и известные зарубежные ученые – Жервез Ж., Гартнер В.

Большой вклад в развитие высокоточных геодезических измерений внесли отечественные ученые Асташенков Г. Г., Большаков В. Д., Бывшев В. А., Васютинский Ю. И., Жуков Б. Н., Брынь М. Я., Щербаков В. В., Ключин Е. Б., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Пискунов М. Е., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Пимшин Ю. В.

В России современные исследования в области прикладной геодезии для обеспечения работ на ускорительно-накопительных комплексах проводят Буренков Д. Б., Лавриненко Е. Д., Полянский А. В., за рубежом – Мартин Д., Миссан Д., Фуш Ж. Ф., Хаблин М.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключалась в разработке, исследовании и реализации методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения на примере Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *научно-технические задачи*:

- выполнить анализ отечественного и зарубежного опыта геодезического обеспечения создания уникальных ускорительно-накопительных комплексов;
- выполнить исследования влияния расстояний на параметры эллипсоидов погрешностей положения отражателя при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica AT 400 серии;
- разработать алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерных трекеров, с учетом заданного допуска на установку технологического оборудования и радиуса ускорительно-накопительного комплекса;

– разработать методику геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения;

– провести экспериментальное исследование разработанной методики геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения (СИ) 4-го поколения СКИФ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований является источник синхротронного излучения – Сибирский кольцевой источник фотонов.

Предметом исследования является методика геодезического обеспечения для создания ускорительно накопительных комплексов.

Научная новизна. Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

– предложен алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерного трекера, позволяющий с заданным допуском осуществлять установку уникального технологического оборудования в проектное положение для различных радиусов кольцевой оси;

– разработана методика геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования ускорительно-накопительных комплексов, позволяющая на этапе проектирования определить оптимальное количество знаков специальной геодезической сети, их расположение в тоннеле и на технологическом оборудовании, а также количество станций лазерного трекера;

– разработан проект специальной геодезической сети для монтажа технологического оборудования уникального ускорительно-накопительного комплекса 4-го поколения СКИФ, первого в Российской Федерации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость выполненного исследования заключается в разработке алгоритма определения пространственного положения и количества знаков и станций лазерного трекера для моделирования вариантов построения специальной геодезической сети, позволяющей создать единую координатную систему ускорительно-накопительного комплекса.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в определении оптимального варианта построения специальной геодезической сети, позволяющего с учетом спектральной чувствительности ускорительного комплекса устанавливать уникальное технологическое оборудование в проектное положение с заданной точностью.

Методология и методы исследований. В диссертационной работе использовались методы аналитической геометрии, метод наименьших квадратов, генератор нормально распределенных случайных чисел с преобразованием Бокса – Мюллера, методы гармонического анализа, а также программные комплексы Spatial Analyzer, PANDA.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанный алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерного трекера, позволяющий увеличить эффективность применения путем определения диапазонов, выраженных в угловой мере, в которых соблюдается допуск на установку технологического оборудования в проектное положение;

– разработанная методика и созданный на ее основе проект специальной геодезической сети для Сибирского кольцевого источника фотонов позволяет создать геодезическое обоснование с параметрами, обеспечивающими установку уникального технологического оборудования в проектное положение с заданными нормативными допусками.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика и содержание диссертации соответствуют области исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтедобывающих комплексов; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и

явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты исследований, выводы и практические рекомендации по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск) в 2016 и 2019 гг. и областном конкурсе «Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области» в 2016 г.

Разработанная методика геодезического обеспечения использовалась при модернизации источника синхротронного излучения ESRFEBS (г. Гренобль, Франция) в реализуемом проекте при участии Института ядерной физики СО РАН при создании CR, входящего в комплекс ускорителей FAIR (г. Дармштадт, Германия), в коллайдере NICA ОИЯИ (г. Дубна), при проектировании коллайдера СТ-фабрика, источника СИ 4-го поколения СКИФ.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в десяти научных работах, пять из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна статья опубликована в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 117 страниц печатного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, содержит 10 таблиц, 73 рисунка, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении доказана актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности в РФ и за рубежом, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, обозначена научная новизна и практическая

значимость выполненных исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и реализации результатов работы, приведена ее структура.

В первом разделе выполнен информационно-аналитический обзор научно-технических публикаций в области прикладной геодезии по геодезическому обеспечению строительства отечественных и зарубежных ускорителей. На основании выполненного анализа установлена основная научно-техническая задача – отсутствие актуальной эффективной методики, позволяющей в едином координатном пространстве выполнить установку технологического оборудования источников синхротронного излучения 4-го поколения в проектное положение с заданными допусками.

Для обеспечения такой нормативной точности устанавливаются следующие требования к точностным параметрам специальной геодезической сети (СГС): средняя квадратическая погрешность (СКП) взаимного положения знаков $m_{СГС} = 0,07$ мм.

Для решения этой научно-технической задачи предлагается представить специальную геодезическую сеть в виде двухступенчатого построения – первичной геодезической сетью, предназначенной для создания и закрепления единой системы координат на весь комплекс инженерных сооружений уникального ускорительного комплекса; вторичной геодезической сетью, предназначенной для установки соответствующего технологического оборудования в проектное положение и проведения дальнейшего мониторинга его пространственного положения.

Разработанная схема, отображающая двухступенчатый состав специальной геодезической сети и ее развитие на этапах монтажа и эксплуатации УНК, приведена на рисунке 1.

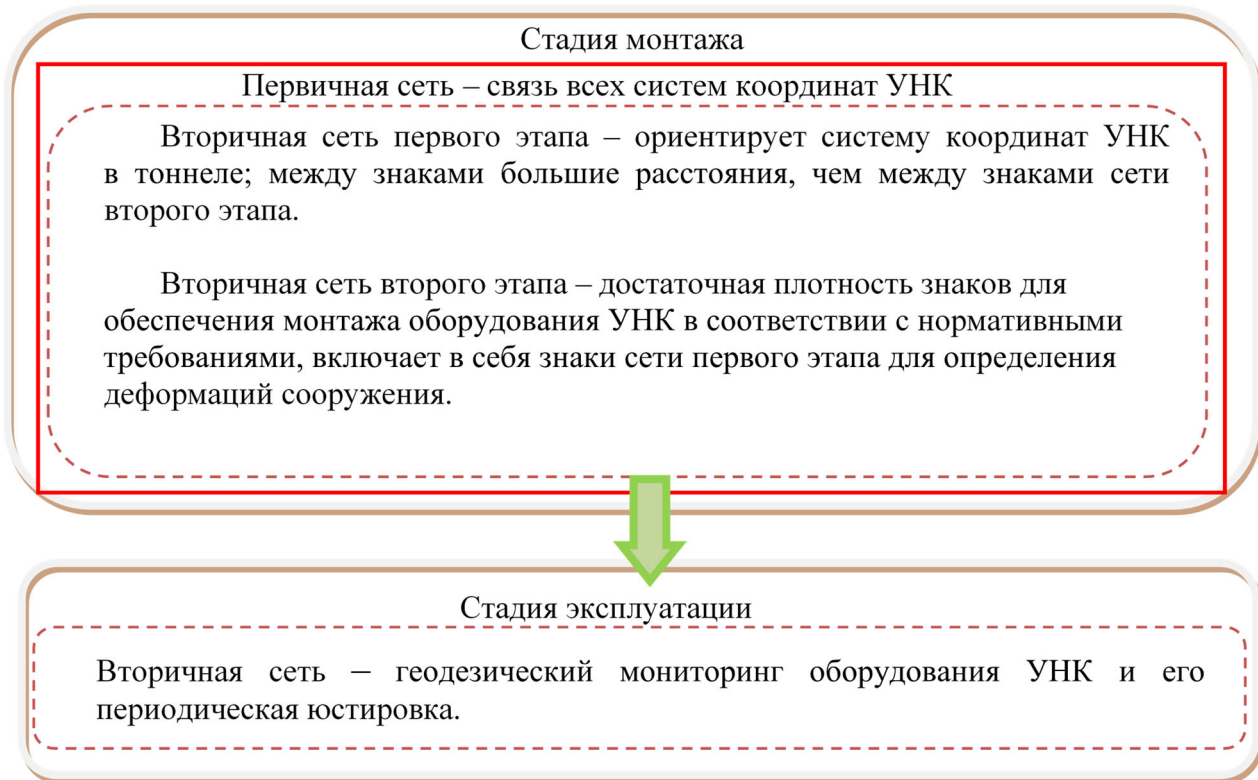


Рисунок 1 – Схема развития геодезических сетей
в жизненном цикле ускорительно-накопительного комплекса

Во втором разделе приведены результаты исследования повторяемости измерений, выполняемых лазерными трекерами API и Leica, а также разработанный алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерного трекера при выполнении работ по установке в проектное положение технологического оборудования на кольцевую ось.

Автором выполнены исследования повторяемости измерений лазерных трекеров API RADIANT и трекеров Leica AT 401, 403. По результатам геодезических измерений вычислены параметры эллипсоидов погрешностей положения отражателя, которыми являются средние квадратические погрешности определения расстояния, горизонтального и вертикального углов. Параметры эллипсоидов погрешностей для лазерных трекеров серии API RADIANT вычисляются по следующим формулам:

$$m_L = 7 \cdot 10^{-4} \cdot L_{(M)}; \quad (1)$$

$$m_{\beta} = m_{\nu} = 1 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}, \quad (2)$$

где m_L – средняя квадратическая погрешность измерения расстояний в режиме абсолютного дальномера, мм; m_{β} и m_{ν} – СКП измерения горизонтальных (β) и вертикальных (ν) углов, выраженных в мм; L – расстояние от лазерного трекера до отражателя, м.

СКП измерения расстояний, указанные в паспорте трекеров 400-й серии, составляют соответственно $\pm 0,01$ мм, а СКП угловых измерений вычисляются по следующей формуле:

$$m_{\beta} = m_{\nu} = 15 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}. \quad (3)$$

Исследования повторяемости измерений лазерным трекером API RADIAN производились в помещении компараторной ИЯФ СО РАН при постоянной температуре $+24,9^{\circ}$ С и отсутствии конвекции воздушных потоков. Это в значительной степени ослабило влияние рефракции, что определяет получение результатов оценки точности, обусловленных только инструментальными погрешностями используемого измерительного оборудования. Сферический отражатель устанавливался на каретку и перемещался электродвигателем по направляющей компаратора. Трекер находился ниже уровня направляющей на 167 мм. Положение отражателя в каждом месте остановки на направляющей измерялось трекером в автоматическом режиме 50 раз. Паспортная точность центрирования отражателя внутри сферы составила $\pm 0,003$ мм. СКП вычислялась по результатам внутренней сходимости измерений с использованием известной формулы Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где Δ_i – отклонение i -го результата измерения от среднего значения; n – число выполненных измерений в серии.

Второй этап исследований точности измерений лазерными трекерами Leica AT401 и 403 производился в здании сборки гирдерных модулей ESRF (Гренобль, Франция).

На рисунке 2 приведены значения средних квадратических погрешностей положения отражателя лазерным трекерам, которые вычислялись по следующей формуле:

$$m_{\text{отр}} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} = \sqrt{m_L^2 + m_\beta^2 + m_v^2}, \quad (5)$$

где $m_x = m_L$; $m_y = m_\beta$; $m_z = m_v$ – параметры эллипсоида погрешности положения отражателя.

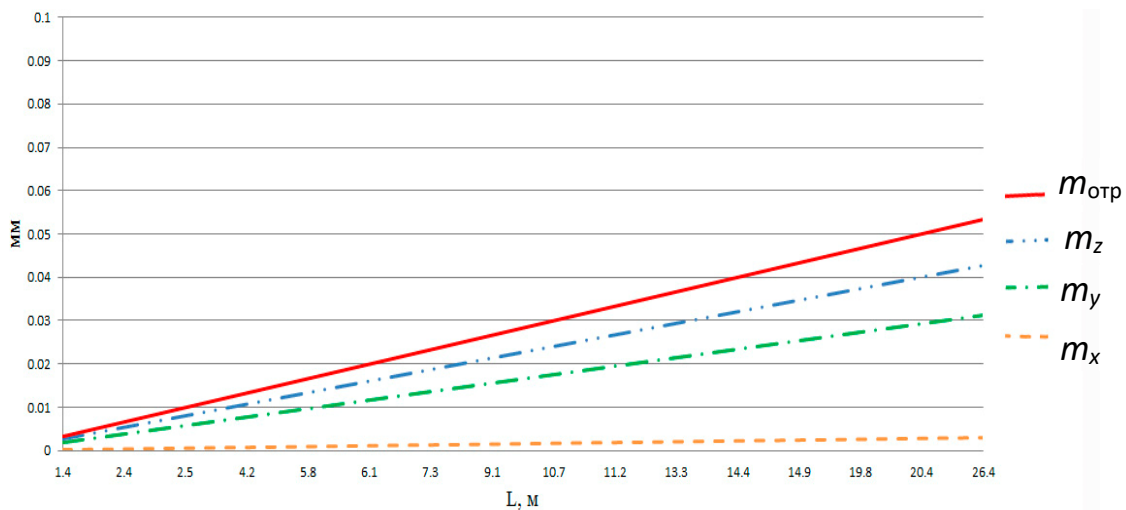


Рисунок 2 – График изменения СКП измерений лазерным трекером Leica AT 403 в зависимости от расстояния до отражателя

Основными требованиями при установке элементов ускорителей заряженных частиц в проектное положение является соблюдение допусков радиального и высотного положения. Установка станции лазерного трекера часто выбирается непосредственно на объекте с учетом создавшейся ситуации (ограничение видимости, неблагоприятные условия для измерений и т. д.). Требуется определить секторы, в которых выполняется допуск на установку технологического оборудования на проектную кольцевую орбиту, со станции лазерного трекера.

Для данного исследования зададим допуск положения магнитной структуры поперечных направлений к орбите:

$$m_{R,Z \text{ доп.}} = 0,05 \text{ мм.} \quad (6)$$

Определим расстояние L от станции лазерного трекера до отражателя, который установлен на технологическом оборудовании, и горизонтальный угол β между направлением на центр системы координат и заданной линией. Для вычисления этих параметров предлагается следующая формула:

$$L = \sqrt{(R^2 + (R+S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R+S) \cdot \cos \alpha)}; \quad (7)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{(R+S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R+S) \cdot L} \right), \quad (8)$$

где R – заданный радиус установки технологического оборудования; S – расстояние от лазерного трекера до заданного радиуса.

Рассмотрим случай установки станции лазерного трекера за проектным радиусом в здании комплекса и определим для этого варианта значение m_R . Такой вариант установки технологического оборудования в проектное положение изображен на рисунке 3.

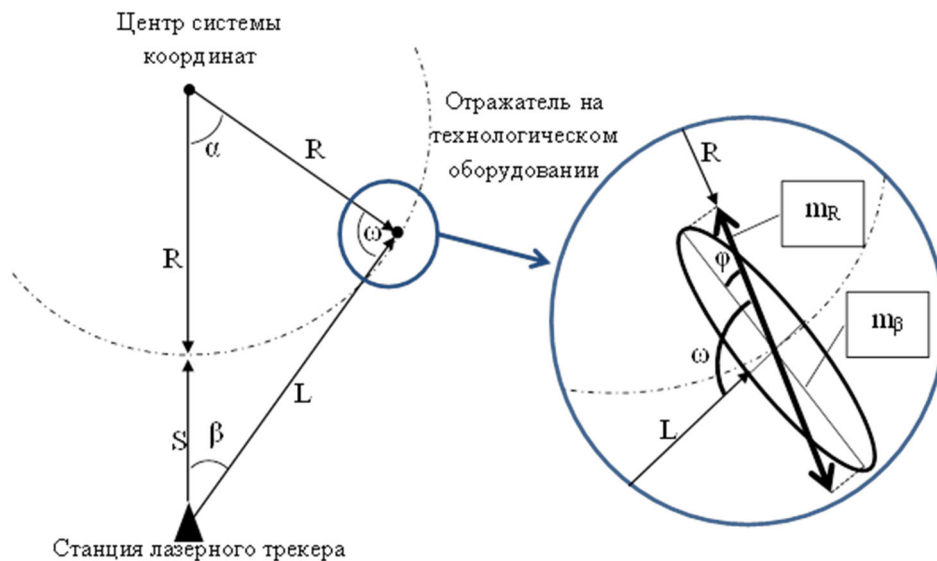


Рисунок 3 – Станция за проектным радиусом

Для m_R необходимо определить угол φ между полуосью эллипсоида погрешностей и заданным направлением. Вычисление этого параметра выполняется по следующим формулам:

$$\omega = 180 - \beta - \alpha; \quad (9)$$

$$\varphi = \omega - 90, \quad (10)$$

где α – центральный угол, в соответствии с рисунком 3; ω – угол между L и R ; φ – угол между полуосью эллипса погрешностей m_β и m_R .

С использованием параметра φ искомое значение m_R вычисляется по следующей формуле:

$$m_R = \cos \varphi \cdot m_\beta. \quad (11)$$

Критерий для выбора диапазона измерений параметров (L и β) на станции лазерного трекера установим следующим образом:

$$m_R \leq m_{R \text{ доп.}} \quad (12)$$

По предложенному алгоритму выполнены вычисления для проектного радиуса $R = 10$ м, $\alpha = n + 5^\circ$ ($n = 0-85^\circ$) и для расстояний станции лазерного трекера от проектного радиуса $S = 0,5; 2; 5; 10$ м.

Результаты, удовлетворяющие этому критерию, приведены на рисунке 4.

Для варианта установки станции лазерного трекера внутри проектного радиуса длина L и угол β необходимо вычислять по следующим формулам:

$$L = \sqrt{R^2 + (R - S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R - S) \cdot \cos \alpha}; \quad (13)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{(R - S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R - S) \cdot L} \right). \quad (14)$$

Для выполнения требования $m_R = 0,05$ мм при выполнении работ по установке технологического оборудования на кольцевую ось с использованием лазерного трекера внутри проектного радиуса, определены следующие оптимальные параметры для $\beta = 63^\circ$ при $S = 0,5$ м и для $\beta = 60^\circ$ при $S = 1$ м.

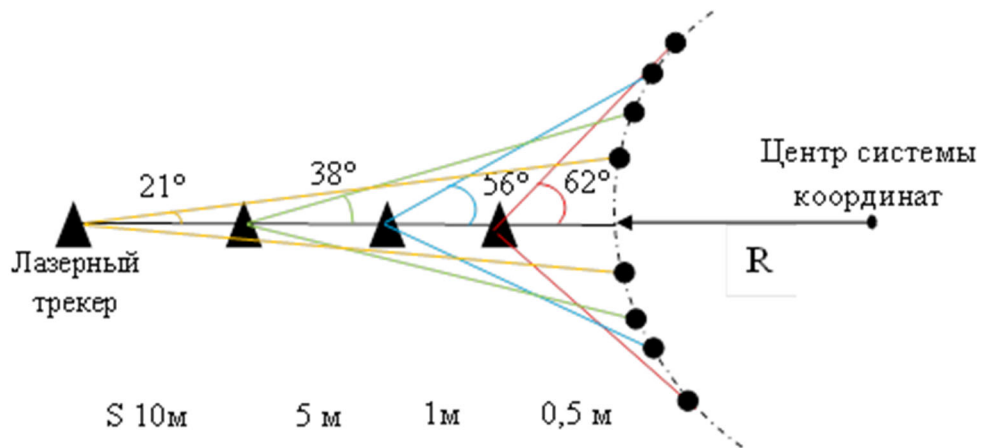


Рисунок 4 – Ограничения по рабочему диапазону β , в пределах которых обеспечивается допуск на выставку оборудования для расстояний

Оптическая структура ускорителей и большинство технологического оборудования проектируются в единой горизонтальной плоскости. Рассмотрим зависимость m_z от изменения величины вертикального угла ν относительно горизонтальной плоскости для расстояний от 0,5 до 10 м. Значение m_z вычисляется по следующей формуле:

$$m_z = \cos \nu \cdot m_{\nu}. \quad (15)$$

Результаты исследований влияния величины вертикального угла ν для различных расстояний S на точность установки технологического оборудования со станции лазерного трекера в проектное положение по высоте (m_z) представлены на рисунке 5.

Полученные в результате выполненных исследований значения полуосей эллипсоидов погрешностей являются математическим основанием настройки модуля Measurement Simulation для моделирования геодезических измерений в программном продукте Spatial Analyzer (полученные коэффициенты: Error distance measurement – 0,0003 мм; parts per million – 0,7).

По разработанному алгоритму получены оптимальные параметры при работе со станции лазерного трекера для установки технологического оборудования с учетом нормативных допусков и радиусов кольцевой оси.

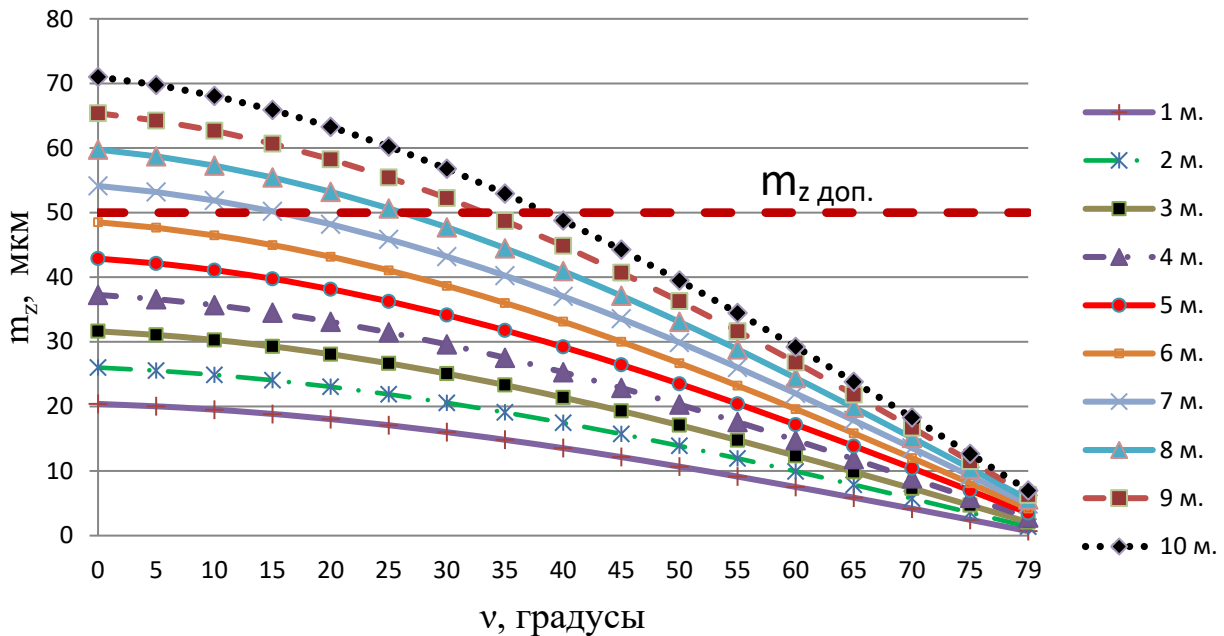


Рисунок 5 – График зависимости величины m_z от изменения угла ν относительно горизонтальной плоскости для расстояний от 0,5 до 10 м

В третьем разделе в виде схемы и математического алгоритма расчета проектных координат и количества знаков специальной геодезической сети представлена разработанная методика проектирования кольцевых сетей ускорительных комплексов.

Разработанная схема методики для проектирования СГС показана на рисунке 6.

Основными достоинствами разработанной автором диссертационной работы методики проектирования специальной геодезической сети для современных ускорительных комплексов являются следующие технологические аспекты:

- основанием для моделирования измерений в специальной геодезической сети являются исследования параметров эллипсоидов погрешностей положения отражателя лазерного трекера и расчеты оптимальных секторов при установке технологического оборудования;

- выполнение проектирования СГС в единой среде (CAD-программы) с разработчиками уникального ускорительно-накопительного комплекса.



Рисунок 6 – Схема методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения (пунктиром обозначены новые блоки)

Расчет проектных координат, количества знаков сети и станций лазерного трекера, после получения исходных данных по параметрам ускорительно-накопительного комплекса предлагается выполнять с использованием следующего алгоритма:

– вычисление расстояний L_1 и L_2 , где L_1 – максимальная длина при монтаже технологического оборудования УНК; L_2 – максимальная длина при измерении знаков сети, при ориентировании лазерного трекера в систему координат (рисунок 7).

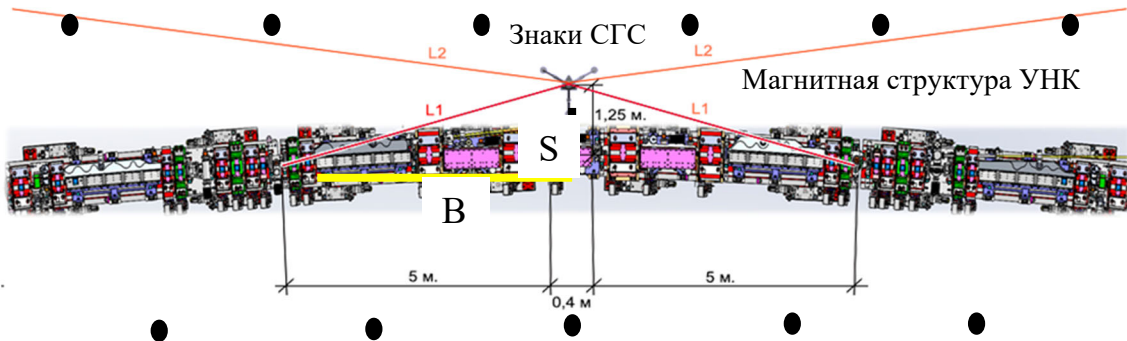


Рисунок 7 – Схема измерений со станции лазерного трекера при монтаже оборудования ускорительно-накопительного комплекса

$$L_1 = \sqrt{S^2 + B^2} = \sqrt{1,25^2 + 5,2^2} = 5,3 \text{ м}; \quad (16)$$

$$L_2 = \frac{L_1 \cdot m_{R,Z_{\text{доп}}}}{\sqrt{m_S^2 + m_{\beta,v}^2}} = 10,6 \text{ м}, \quad (17)$$

где B – катет в прямоугольном треугольнике L_1 S B ; L_1 – максимальная длина для контроля положения оборудования; L_2 – максимальная длина между знаками специальной геодезической сети;

– вычисление проектных координат СГС УНК. Радиальное положение соответствует радиусам внешнего и внутреннего стен тоннеля комплекса.

Азимутальный угол между знаками выбирается из расчета зоны перекрытия между станциями лазерного трекера с учетом требования минимального их количества. Вычисление азимутального угла производится по формуле:

$$\tau_{R_{1,2}} = \frac{(L_2 / 2) \cdot 180}{\pi \cdot R_{1,2}}, \quad (18)$$

где R_1 – внешний радиус стены тоннеля; R_2 – внутренний радиус.

Высотное положение знаков при проектировании сети ускорительного комплекса следует оптимально установить +0,5 м от пола – для условно первого знака на стене тоннеля внешнего радиуса и +2 м – для второго и далее с чередованием. Для первого знака на стене внутреннего радиуса +2 и +0,5 м для второго и далее с чередованием;

– вычисление общего количества знаков производится по формуле

$$N = \frac{360}{\tau_{R_1}} + \frac{360}{\tau_{R_2}}; \quad (19)$$

Схема построения СГС УНК приведена на рисунке 8;

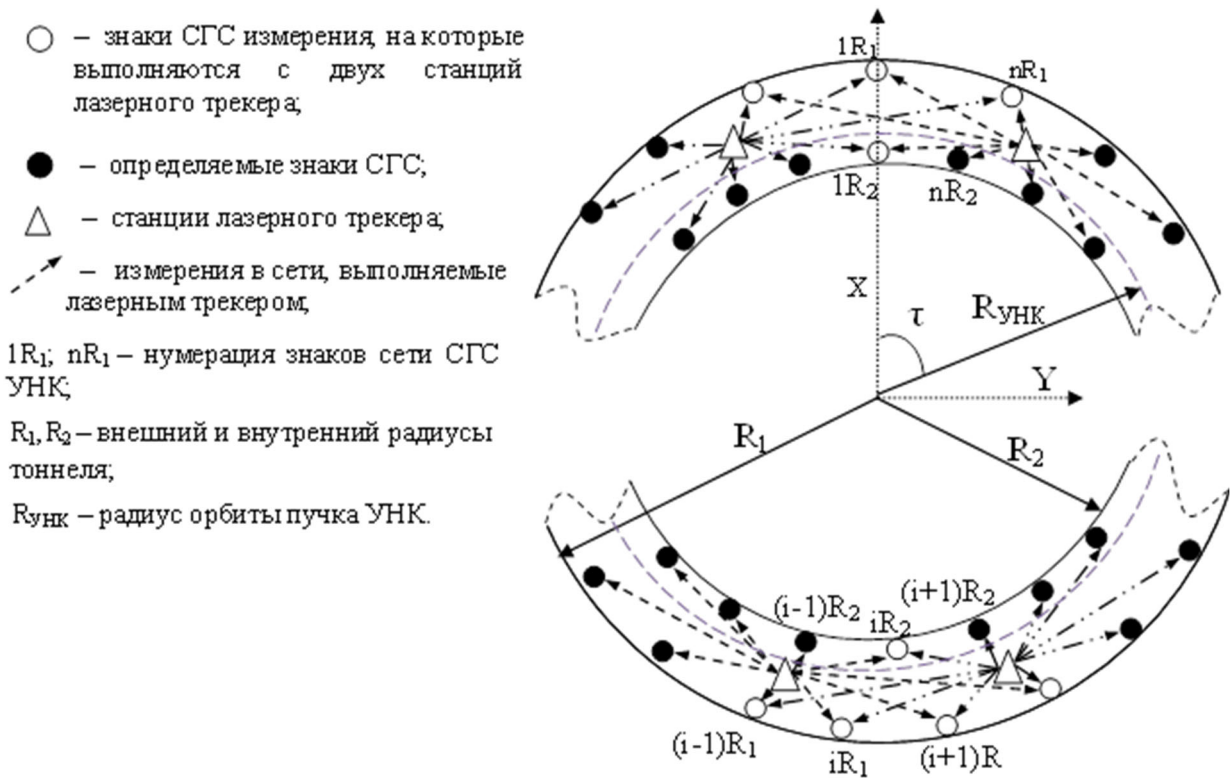


Рисунок 8 – Схема построения специальной геодезической сети УНК

– определение координат положения станций инструмента. Радиальное положение:

$$R_{\text{ст.}} = R - 1, \quad (20)$$

где R – радиальное положение орбиты пучка частиц, м.

Угол между станциями вычисляется по формуле

$$\tau_{ст.} = \frac{L_2 \cdot 180^0}{\pi \cdot R_{ст.}} \quad (21)$$

По разработанной методике произведены расчеты и моделирование измерений трех вариантов построения СГС для кольцевой сети со средним периметром 282,7 м. Параметры СГС рассматриваемых вариантов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты проектируемых СГС для тоннеля периметром 282,7 м

Вариант СГС	Количество знаков в сети	Расстояние между знаками (м)		Центральные углы (°)		Количество станций лазерного трекера
		Внешний радиус	Внутренний радиус	Внешний радиус	Внутренний радиус	
1	112	8,3	7,8	5,1	5,1	28
2	162	3,6	3,3	4,4	4,3	41
3	378	1,5	1,4	1,9	1,8	95

Оптимальным вариантом будет комбинация варианта 1, в котором шаг между знаками порядка 8 м, с вариантом 2, где шаг между станциями лазерного трекера 7 м (обозначен вариантом сети № 4). Результаты среднеквадратических отклонений от проектных координат приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Отклонения от проектных значений результатов моделирования геодезических измерений знаков СГС

Вариант построения сети	Средние квадратические погрешности (мм)	
	m_R	m_Z
1	0,11	0,24
2	0,16	0,12
3	0,09	0,12
Предлагаемый вариант построения СГС	0,11	0,12

В четвертом разделе выполнена апробация разработанной методики для проекта источника синхротронного излучения СКИФ. На основании исходных

данных, представленных физиками и конструкторами ускорительно-накопительного комплекса, выполнены расчеты проектных координат пунктов СГС.

Проектируемый ускоритель будет состоять из линейного ускорителя электронов на 200 МэВ, длиной 25 м; накопительного кольца бустера с максимальной энергией 3 ГэВ и периметром 158 м; транспортных каналов ввода-вывода пучка электронов; основного кольца синхротрона с энергией 3 ГэВ и периметром 476 м; 6 пользовательских станций с каналами вывода СИ (1-я очередь до 2024 г.).

Применительно к монтажу магнитной структуры источника четвертого поколения на примере СКИФ заданные проектом допуски приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Нормативные допуски на установку технологического оборудования источника СИ СКИФ в проектное положение

Название технологического оборудования	Допуск на точность установки оборудования в проектное положение, мм
Квадрупольные линзы	0,03–0,05
Гирдер	0,07

СКП положения знака в каждом отдельном цикле соответствует требованиям (0,07 мм). Параметры СГС и величины отклонения от проектных координат, выбранных за исходные, представлены в таблице 4. Для повышения производительности труда расстояние между станциями лазерного трекера предлагается выбрать 12 м (уменьшение количества станций с 51 для $L_2 = 10,6$ м до 40 для $L_2 = 12$ м без существенного увеличения значения СКП для знаков сети).

Таблица 4 – Параметры СГС и величины отклонения от проектных значений координат СГС источника СИ СКИФ

Количество знаков в сети	Центральные углы (°)		Количество станций лазерного трекера	L_2 (м)	Средние квадратические погрешности (мм)	
	Внешний радиус	Внутренний радиус			m_R	m_Z
205	3,43	3,59	40	12	0,32	0,13

Проект фрагмента СГС со станциями лазерного трекера, разработанного на основании предложенной методики, представлен на рисунке 9.

Важным этапом проектирования ускорительного комплекса является расчет спектральной чувствительности замкнутой орбиты к погрешностям элементов магнитной структуры, допущенными при установке в проектное положение. Спектральная чувствительность позволяет определить опасные гармоники возмущения – резонансные раскачки амплитуд бетатронных колебаний.

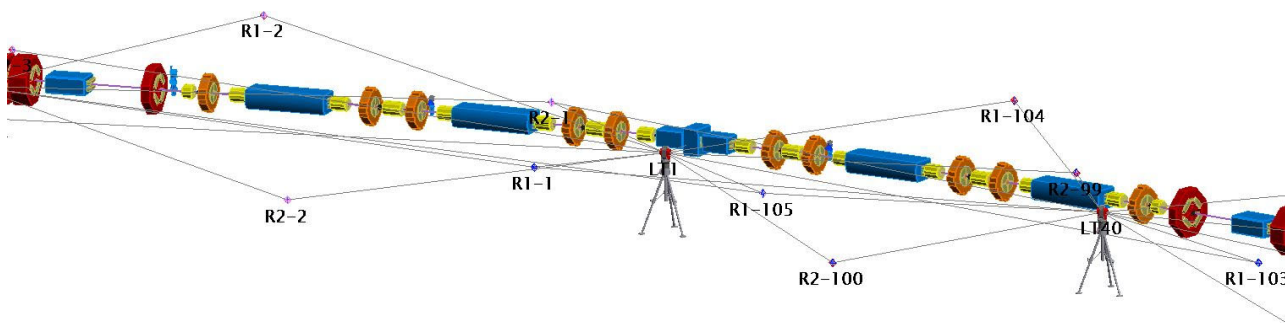


Рисунок 9 – Схема измерений геодезической сети СКИФ основного кольца

На основе проведенного спектрального анализа предложенного варианта сети было установлено, что урвненные координаты пунктов СГС позволяют устанавливать технологическое оборудование УНК в проектное положение в соответствии с заданными допусками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных научных исследований цель диссертационной работы достигнута. Получены следующие основные результаты:

- выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта создания УНК, установлено, что для геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования каждого проекта применялись свои уникальные технологические решения и отсутствует единая методика создания специальной геодезической сети с применением лазерных трекеров;

– в результате выполненных исследований влияния расстояний на параметры эллипсоидов погрешностей при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica 400-й серии определены коэффициенты, необходимые для настройки модуля проектирования специальной геодезической сети (Measurement Simulation) в программном продукте Spatial Analyzer;

– разработан алгоритм вычисления оптимальных параметров (углов и расстояний от инструмента до отражателя) при работе с лазерными трекерами с учетом заданного допуска и радиуса проектной кольцевой оси, позволяющий повысить производительность труда при установке технологического оборудования и обеспечить достижение необходимой точности;

– разработанная методика геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения позволяет получить проектные координаты геодезических знаков специальной сети, произвести моделирование геодезических измерений в программном продукте Spatial Analyzer и получить оптимальный вариант СГС;

– проведено экспериментальное исследование разработанной методики геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения 4-го поколения СКИФ в соответствии с требованиями ($m_{\text{СГС}} = 0,07$ мм) и проектным радиусом ($R = 476$ м), в результате разработан проект создания специальной геодезической сети с оптимальным количеством определяемых пунктов и станций лазерного трекера.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при создании уникального технологического оборудования российских и зарубежных ускорительных комплексов.

Перспективы дальнейшего диссертационного исследования в этом направлении состоят в совершенствовании и исследовании предложенной методики проектирования специальных геодезических сетей для обеспечения строительства, монтажа и пространственного мониторинга технологического оборудования отечественных и зарубежных коллайдеров и источников синхронного излучения последующих поколений.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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 // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.
2. 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.
3. Сердаков, Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров [Текст] / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 2–6.
4. Сердаков, Л. Е. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF [Текст] / Л. Е. Сердаков, Д. Мартин, П. П. Мурзинцев // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8
5. О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования [Текст] / Л. Е. Сердаков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 22–25.
6. Status of NSLS-II booster [Текст] / Gurov S. M., Burenkov D. B., Karnaev S. E., Serdakov L. E. et al. // Physics Procedia Ser. Proceedings of the International Conference «Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application». – SFR. – 2016. – P. 74–81.
7. Исследование точностных характеристик дальномеров API LASER TRAKER 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // ГЕО-Сибирь-2011: сб. материалов. – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 9–12.

8. Геодезический мониторинг вертикальных деформаций тоннелей ускорительных комплексов ИЯФ СО РАН [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 128–132.

9. Исследования зависимости погрешностей геодезических измерений в продольном и поперечном направлениях относительно визирного луча API Tracker 3 от расстояния [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1.– С. 3-6.

10. Сердаков, Л. Е. Создание 3D-модели участка перепускного канала Бустер-Нуклотрон на основе данных геодезических измерений [Текст] / Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т 1. – С. 63–66.