

Л. Е. Сердаков^{1✉}, Н. А. Борщ², К. В. Паульзин²

Геодетическое сопровождение установки в проектное положение гирдерных модулей накопителя СКИФ

¹ Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: LeoSerd@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрено геодетическое сопровождение установки гирдерных модулей накопителя ЦКП «СКИФ». Основной измерительный прибор – лазерный трекер Leica AT403 (погрешность $\pm 15 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм/м}$). Внутренняя геодетическая сеть тоннеля имеет СКП положения знаков не более 0,050 мм. Выявлены значительные деформации тоннеля (локальные смещения до 1 мм за 5 месяцев), что требует регулярного мониторинга. Допуск на поперечную установку гирдера – $\pm 0,10 \text{ мм}$, для критических элементов – $\pm 0,03 \text{ мм}$. Предварительная выставка модулей показала отклонения, устраняемые финальной юстировкой от актуального цикла измерений сети (не старше 1 месяца). Все 112 гирдеров собраны, вакуумная камера замкнута. Подтверждена возможность достижения субмиллиметровой точности.

L. E. Serdakov^{1✉}, N. A. Borshch², K. V. Paulzin²

Geodetic surveying support for the installation of the SKIF storage ring girder modules into their design position.

¹ G.I.Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: LeoSerd@yandex.ru

Abstract. The paper addresses geodetic support for the installation of girder modules of the SKIF storage ring. The primary instrument is the Leica AT403 laser tracker (accuracy $\pm 15 \text{ }\mu\text{m} + 6 \text{ }\mu\text{m/m}$). The internal geodetic network provides a root-mean-square error of reference marks not exceeding 0.050 mm per epoch. Significant tunnel deformations (local displacements up to 1 mm over five months) were identified, requiring regular monitoring until settlement decays. The tolerance for transverse girder positioning is $\pm 0.10 \text{ mm}$, and for critical beamline elements — $\pm 0.03 \text{ mm}$. Preliminary alignment of modules revealed deviations that are corrected during final alignment based on a network epoch not older than one month. All 112 girders have been assembled and the vacuum chamber is closed. Sub-millimeter positioning accuracy is achievable with the proposed methodology.

Введение

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа СО РАН – источник синхротронного излучения поколения «4+» проект класса «мегасайнс».

ЦКП «СКИФ» представляет собой комплекс из 27 зданий, а также инженерного и технологического оборудования, обеспечивающий выполнение научных исследований на пучках синхротронного излучения, схема основных частей источника синхротронного излучения представлена на рис. 1.

Уникальные характеристики нового синхротронного источника позволят проводить передовые исследования с яркими и интенсивными пучками рентгеновского излучения во множестве областей – химии, физике, материаловедении, биологии, геологии, гуманитарных науках, а также решить актуальные задачи инновационных и промышленных предприятий.



1 – инжектор и транспортный канал Бустер-Накопитель; 2 – здание Накопителя; 3 – зал пользовательских станций; 4,5 – станции 1-3 и 1-5, вынесенные отдельными зданиями.

Рис. 1. Основные составные части источника синхротронного излучения СКИФ

Требования на установку в проектное положение элементов, формирующих траекторию пучка частиц современных источников СИ, таких как «СКИФ», требуют субмиллиметровой точности позиционирования оборудования. Искажения камеры (в которой будет пролетать пучок), вызванные ошибками установки в проектное положение, могут привести к энергетическим потерям и снижению эффективности параметров всего комплекса. [1, 2]

Методы и материалы

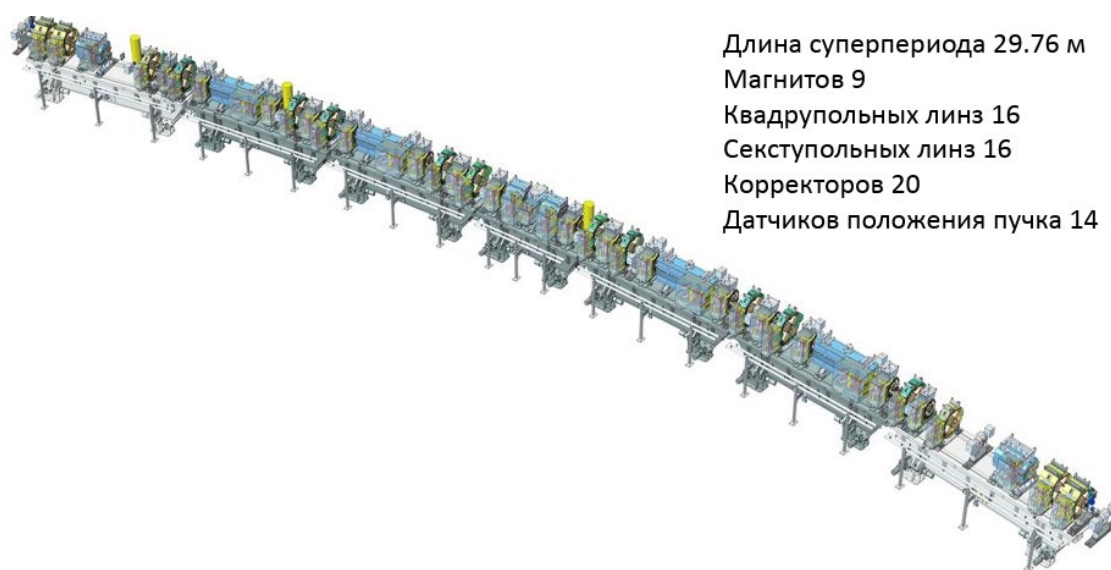
Основным прибором, используемым для контроля монтажа физического оборудования ЦКП СКИФ, является лазерный трекер Leica AT403. Технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики Leica AT403

Трёхкоординатная погрешность измерений (максимально допустимая ошибка, МРЕ)	
Статический режим	$\pm 15 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм/м}$
Динамический режим	$\pm 30 \text{ мкм} + 12 \text{ мкм/м}$
Горизонтирование прибора	$\pm 1 \text{ уг. сек}$
Максимальная дальность измерений	160 м

Измерения производятся в «контактном» режиме, то есть пространственные координаты объекта получают через установку на него специального сферического отражателя. Учитывая оффсет отражателя, посредством программного обеспечения получают координаты поверхности объекта. Центровка призмы внутри тела отражателя составляет порядка 0,008 мм (отдельные отражатели имеют центровку точнее).

Кольцо накопителя состоит из 16 суперпериодов. Каждый суперпериод включает в себя 7 гирдерных модулей (всего 112 гирдеров), на каждом из которых расположено от 5 до 7 электромагнитов, допуск на установку в проектное положение самых критичных элементов составляет $\pm 0,03 \text{ мм}$. Суперпериод накопителя СКИФ показан на рис. 2.

**Рис. 2.** Суперпериод накопителя СКИФ

Сборка гирдерных модулей производилась в корпусе стендов и испытаний, в котором созданы все условия для высокоточного позиционирования электромагнитов (термостабилизация, отсутствие случайных и систематических потоков воздуха, исключено попадание прямых солнечных лучей). В качестве координатной основы для установки в проектное положение служат геознаки, закрепленные непосредственно на гирдере.

После завершения этапа сборки гирдерные модули доставляются в кольцо накопителя на специальной машине, позволяющей установить гирдерную сборку в стесненных условиях тоннеля.

Для соблюдения требований к точности в накопителе имеется внутренняя геодезическая сеть, служащая основой непосредственно для высокоточного монтажа и юстировки физического оборудования (рис. 3). Геознаки закреплены с плотностью порядка 1 геознака на 1,25 метра. Среднеквадратическая погрешность положения геознака сети накопителя в цикле измерений не более 0,050 мм, что позволяет производить ориентирование прибора в любом месте тоннеля с обозначенной точностью. Однако деформации конструкций тоннеля сильно влияют на взаимное положение знаков сети, так как строительство здания закончилось только зимой 2025 года. Например, за 5 месяцев после проведения цикла наблюдений сети, локальные деформации тоннеля в области 8 суперпериода составили 1 мм. Это является критическим для эксплуатации ускорительного комплекса и будет требовать повышенного внимания с точки зрения геодезического мониторинга до момента затухания осадок [3].

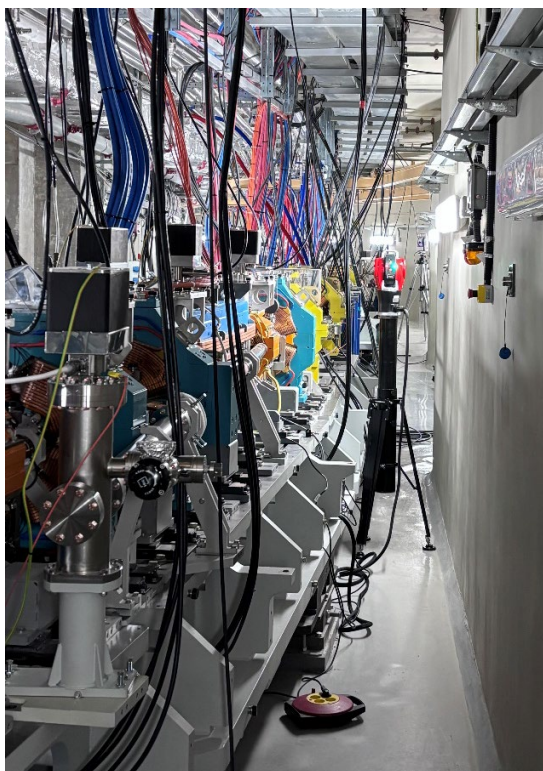


Рис. 3. Лазерные трекеры в тоннеле накопителя

Перечень работ, лежащих в зоне ответственности геодезической службы при монтаже оборудования накопителя СКИФ:

- трассировка пучка и вынос точек крепления опор гирдерных модулей и отдельно стоящих подставок элементов ускорителя на полу тоннеля;
- горизонтирование опор;

- предварительная установка в проектное положение с целью стыковки вакуумной системы ускорителя;
- установка выводов синхротронного излучения и фронтендов на проектные оси;
- контроль положения вставных устройств на прямолинейных промежутках арки ускорителя;
- финальная установка в проектное положение от актуального цикла геодезической сети (не менее 1 месяца с момента измерений) гирдерных модулей и прямолинейных промежутков с вставными устройствами.

Допуск на установку в проектное положение гирдерных модулей составляет $\pm 0,10$ мм в поперечных направлениях движения пучка. Изображение одного из типов гирдера представлено на рис. 4.

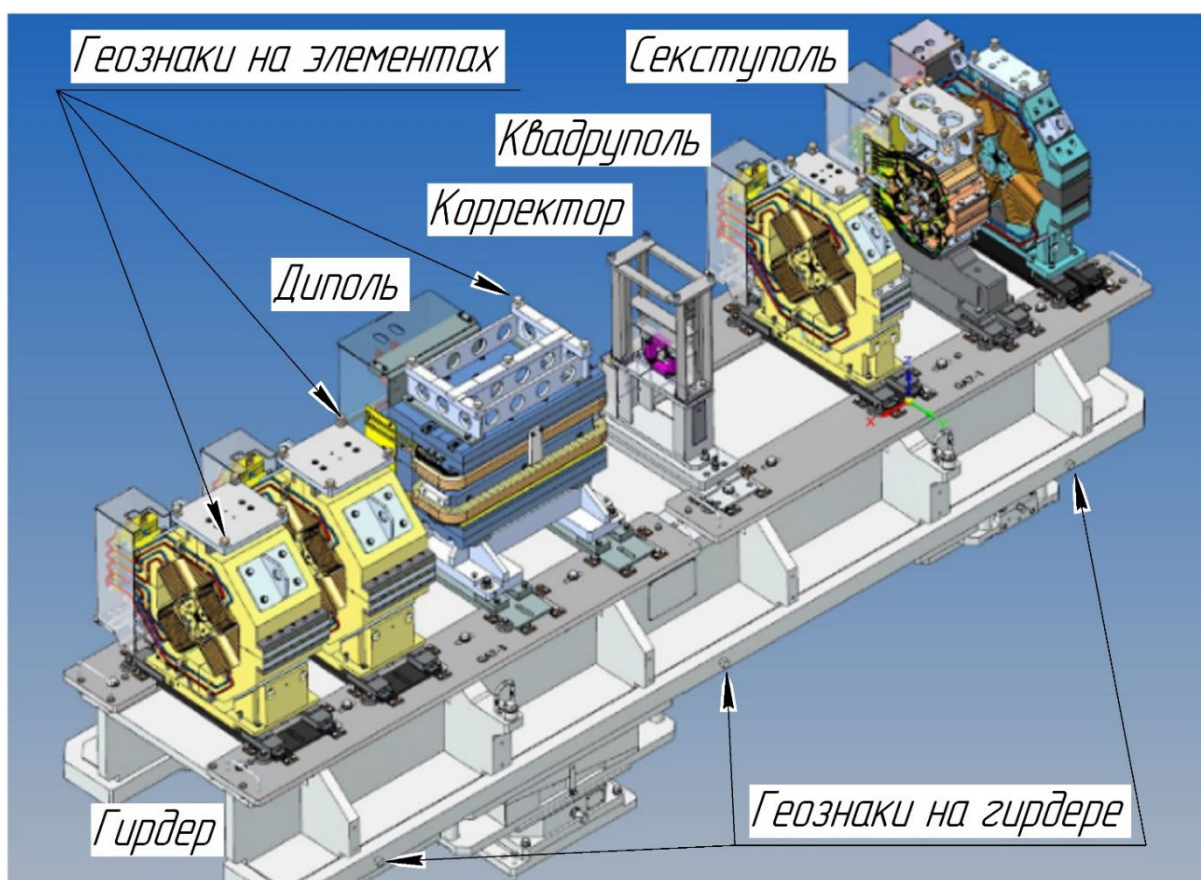


Рис. 4. Гирдер длиной 3800 мм с установленными элементами.

Конструктивно, гирдер включает в свой состав кроме основной несущей балки, на которой устанавливаются элементы ускорителя, три опоры. Каждая опора имеет планово-высотные юстировки [4-6]. Высотное перемещение гирдера производится по клиньям, с углом в 7° , обеспечивающим плавное перемещение в диапазоне ± 15 мм. Юстировка в горизонтальной плоскости обеспечивается за счет смещения полусферы, на которую опирается часть опоры с клинь-

ями, относительно закрепленной к полу тоннеля её нижней части, рис. 5. Диапазон перемещения в плане также ± 15 мм.

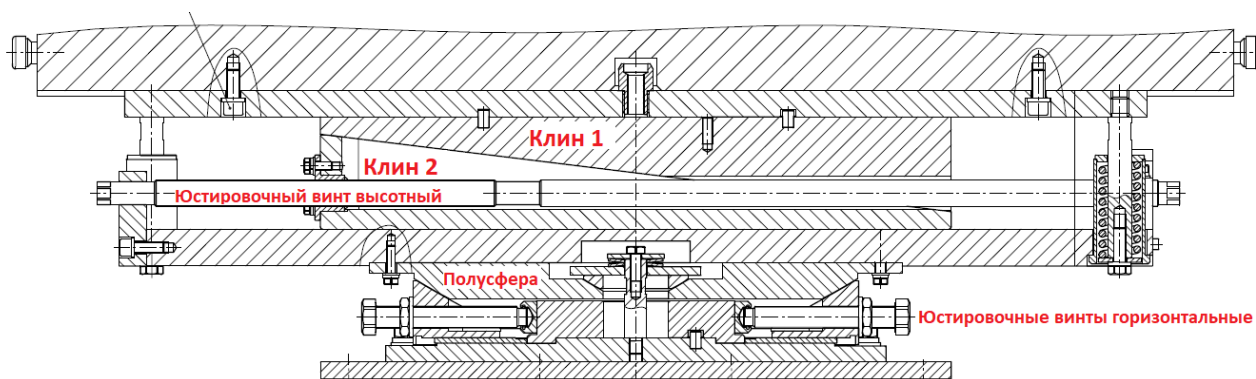


Рис. 5. Юстировочные узлы опоры гирдерного модуля накопителя

Заключение

В результате выполнения геодезических работ по сопровождению установки гирдерных модулей накопителя ЦКП «СКИФ» подтверждена возможность достижения субмиллиметровой точности позиционирования элементов ускорительного комплекса с использованием лазерных трекеров Leica AT403 и API Radian. Установка в проектное положение гирдерных модулей с допусками, обозначенными проектом ускорительного комплекса, возможно при наличии опорной геодезической сети с СКП взаимного положения геодезических знаков не хуже 0,05 мм. Обозначены основные этапы геодезического контроля: от трассировки осей и горизонтирования опор до предварительной и финальной юстировки модулей. Выявлено существенное влияние деформаций тоннеля (локальные смещения до 1 мм за 5 месяцев) на стабильность геодезической основы, что требует регулярного мониторинга до затухания осадок. Предварительная установка гирдерных модулей показала отклонения, требующие финальной юстировки в соответствии с допуском $\pm 0,03$ мм для наиболее критичных элементов. На данный момент времени все суперпериоды собраны, вакуумная камера замкнута, для дальнейшей финальной выставки производится съемка опорной сети накопителя. Завершение полного объема запланированных работ и соблюдение заданных допусков обеспечат успешный запуск источника синхротронного излучения и его эффективную эксплуатацию.

Результат предварительной выставки одного из гирдерных модулей представлен на рис. 6.

Group to Group Relationship Groups: USMN MA2.GA4 Final to MA2.GA4 CHECK Reported in A: MA2.BDC2-SE2											
Name	USMN MA2.GA4 Final			MA2.GA4 CHECK					Delta		
	X1 (mm)	Y1 (mm)	Z1 (mm)	X2 (mm)	Y2 (mm)	Z2 (mm)	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)	Mag (mm)	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE1.qz1	-1399.462	-169.807	369.382	-1399.384	-169.817	369.438	0.078	-0.009	0.057	0.097	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE1.qz2	-1608.757	-186.288	368.963	-1608.649	-186.280	369.011	0.108	0.009	0.048	0.119	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE1.qz3	-1626.894	42.915	368.613	-1626.791	42.892	368.671	0.103	-0.022	0.058	0.121	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE1.qz4	-1417.590	59.379	368.764	-1417.502	59.355	368.814	0.088	-0.025	0.050	0.105	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC1.qz1	-1221.441	-173.214	363.877	-1221.376	-173.235	363.931	0.065	-0.021	0.054	0.087	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC1.qz2	-1236.563	66.453	364.226	-1236.482	66.414	364.275	0.082	-0.039	0.049	0.103	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC1.qz3	-1054.051	-32.417	364.040	-1053.984	-32.455	364.088	0.067	-0.038	0.049	0.091	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC1.qz4	-885.297	88.490	364.198	-885.241	88.429	364.247	0.056	-0.062	0.049	0.097	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC1.qz5	-870.167	-151.080	363.977	-870.125	-151.119	364.026	0.042	-0.039	0.049	0.075	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BPC1.qz1	-749.659	-154.520	367.972	-749.630	-154.570	368.006	0.029	-0.050	0.035	0.068	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BPC1.qz4	-529.826	-145.611	367.946	-529.815	-145.669	367.990	0.011	-0.057	0.043	0.073	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC2.qz1	-409.167	-134.032	363.915	-409.180	-134.109	363.969	-0.014	-0.076	0.054	0.095	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC2.qz2	-411.785	106.070	364.004	-411.765	105.995	364.035	0.020	-0.075	0.031	0.084	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC2.qz3	-234.594	-1.998	363.851	-234.598	-2.078	363.890	-0.004	-0.080	0.039	0.089	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC2.qz4	-59.888	110.101	364.006	-59.902	110.007	364.040	-0.014	-0.094	0.034	0.101	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.BDC2.qz5	-57.039	-129.939	363.913	-57.058	-130.010	363.950	-0.019	-0.070	0.036	0.081	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE2.qz1	329.911	-115.039	368.704	329.764	-115.078	368.749	-0.146	-0.039	0.046	0.158	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE2.qz2	119.976	-115.021	368.673	119.852	-115.039	368.692	-0.124	-0.019	0.020	0.127	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE2.qz3	120.071	114.972	368.660	119.960	114.933	368.639	-0.111	-0.039	-0.021	0.120	
project:USMN MA2.GA4 Final:MA2.SDE2.qz4	330.026	114.871	368.707	329.900	114.805	368.729	-0.125	-0.066	0.022	0.143	

Рис. 5. Отклонения от проектного положения четвертого гирдерного модуля на втором суперпериоде

Благодарности

Выражаем благодарность ИЯФ СО РАН за предоставленное оборудование и предоставленную возможность провести данное исследование на базе сибирского кольцевого источника фотонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буренков, Д. Б., Мурзинцев, П. П., Полянский, А. В., Пупков, Ю. А., Сердаков, Л. Е. Геодезический мониторинг вертикальных деформаций тоннелей ускорительных комплексов ИЯФ СО РАН // Научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 4-9.
2. Буренков, Д. Б., Мурзинцев, П. П., Полянский, А. В., Пупков, Ю. А., Сердаков, Л. Е. О геодезическом сопровождении Booster NSLS-II Брукхейвенской национальной лаборатории Министерства энергетики США // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 126-131.
3. Марфенко, С. В. Высокоточные геодезические работы при строительстве и эксплуатации прецизионных сооружений: учеб. пособие. – М.: МИИГАиК, 2004. – 36 с.
4. Мурзинцев, П. П., Буренков, Д. Б., Полянский, А. В., Сердаков, Л. Е. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства, эксплуатации и мониторинга ускорительно-накопительных комплексов: монография / под общ. ред. П. П. Мурзинцева. – Новосибирск: Сибпринт, 2021. – 231 с.
5. Полянский, А. В. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа: дис. канд. техн. наук: 25.00.32 / Полянский Андрей Викторович. – Новосибирск, 2015. – 118 с.
6. Сердаков, Л. Е. Разработка методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения: дис. канд. техн. наук: 25.00.32 / Сердаков Леонид Евгеньевич. – Новосибирск, 2020. – 117 с.

© Л. Е. Сердаков, Н. А. Борщ, К. В. Паульзин, 2026