

УДК 528.48

DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-67-76

## О геодезическом обеспечении создания комплекса «Скиф»

А. В. Полянский<sup>1</sup>, В. С. Крапивин<sup>1</sup>, Д. Б. Буренков<sup>1</sup>, Е. С. Вонда<sup>1</sup>, Л. Е. Сердаков<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: naufan@ngs.ru

**Аннотация.** Современные источники синхротронного излучения являются технически сложными установками класса «MegaScience». Реализуемый в Новосибирской области пилотный проект «СКИФ» должен стать первым из проектируемых специализируемых синхротронных источников четвертого поколения в стране. Целью геодезического обеспечения данного проекта является соблюдение требований к взаимному положению электромагнитных осей элементов при монтаже комплекса, определенных расчетными физическими параметрами. В статье представлены характеристики ускорительно-накопительного комплекса, основные задачи геодезического обеспечения стадий реализации проекта и принципы их решения. Для создания геодезической основы выбран подход двухступенчатого построения опорных сетей. Приведены данные о количестве геодезических знаков предлагаемых вариантов сетей, а также результаты гармонического анализа сети накопителя.

**Ключевые слова:** проектирование, опорная геодезическая сеть, ускорительно-накопительный комплекс, источник синхротронного излучения, геодезическое обеспечение, высокоточный монтаж, гирдерный модуль

### Введение

Реализация пилотного проекта «СКИФ» (Сибирский кольцевой источник фотонов) позволит обеспечить регион современной инфраструктурой и создать условия для проведения широкого спектра научных исследований и инновационных разработок.

Источник синхротронного излучения (СИ) состоит из основного кольца (накопитель) и ин-

жекционной части, включающей линейный ускоритель (линая), бустерный синхротрон (бустер) [1], каналы транспортировки электронных пучков от линая до бустера, от бустера до основного кольца и каналы вывода пучков СИ (фронтэнды). Общий вид проектируемого комплекса представлен на рис. 1.

Основные характеристики системы ускорительно-накопительного комплекса приведены в табл. 1.



Рис. 1. Архитектурный облик комплекса «СКИФ»

Задачи геодезического обеспечения создания комплекса «СКИФ» разнообразны по точности и методическим особенностям:

- геодезический контроль геометрических параметров магнитных элементов и вакуумных камер, определение взаимного пространственного положения геодезических знаков и магнитной оси элементов, создание каталога координат геодезических знаков и узловых точек орбиты элементов;
- высокоточный монтаж магнитных элементов и вакуумной системы на гирдерах;

- проектирование и создание опорных геодезических сетей;

- высокоточный монтаж гирдерных модулей в сооружениях комплекса.

Архитектура системы геодезического контроля должна обеспечивать выполнение следующих требований:

- минимизация издержек, связанных с дополнением и удалением узлов внутри системы;
- сохранность информации и отдельных объектов системы.

Таблица 1

Основные характеристики ускорительно-накопительного комплекса «СКИФ»

Линак	Энергия выпуска: 200 МэВ Длина: 15 м Длительность пучка электронов: 0,2 нс
Бустер	Энергия выпуска: 3 ГэВ Периметр: 158 м Длительность цикла ускорения: 1 с
Основное кольцо	Рабочая энергия: 3 ГэВ Периметр: 477 м Максимальный рабочий ток: 400 мА Эмиттанс: 186 пм*рад Количество экспериментальных станций: 30

**Требования и стратегия геодезического обеспечения стадий создания комплекса**

Строительство сооружений и зданий для размещения крупных блоков комплекса, с точки зрения взаимного расположения, регламентируется нормами, обычными для гражданского строительства. Уточняется взаимное положение крупных блоков ускорительных комплексов в большинстве случаев после окончания строительства и проведения исполнительной съемки. На основании исполнительной съемки могут вноситься локальные изменения в проект перепускных каналов [2]. Так как каналы транспортировки имеют возможность корректировать траекторию пучка в достаточно больших пределах, величина погрешности определения взаимного положения накопителя и бустера лежит в рекомендуемом практикой диапазоне  $\pm 3,0$  мм. На стадии строительства комплекса необходимо обеспечить выполне-

ние геодезических работ, позволяющих гарантировать соблюдение проектных геометрических размеров кольцевых сооружений «СКИФ» с погрешностью не хуже  $\pm 25$  мм. Отклонение от проектного горизонта поверхности пола в сооружениях ускорительно-накопительного комплекса не должно превышать  $\pm 10$  мм.

Геодезические опорные сети ускорительных комплексов создаются по принципу нескольких ступеней [3]. Первичная сеть обеспечивает взаимное ориентирование вторичных опорных сетей всех крупных блоков ускорительного комплекса, (рис. 2). Оценка точности первичных сетей производится с использованием актуальных средств программного обеспечения [4]. Часто вторичные сети с областью перекрытия в зонах впуска и выпуска связаны на малой базе из-за необходимости радиационной защиты, что требует наличия дополнительных связей в виде первичной сети.

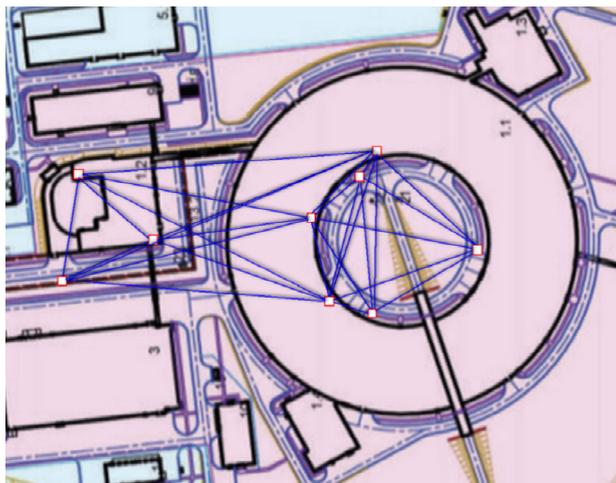


Рис. 2. Вариант первичной сети

Вторичные геодезические опорные сети рассматриваются как свободные и служат основой непосредственно для установки физического оборудования, создаются для высокоточных измерений лазерными трекерами (рис. 3). Сети создаются в условной системе координат, их форма определяется формой объектов [5]. Мировая практика создания ис-

точников СИ с близкими к «СКИФ» характеристиками, требования, предъявляемые к точности позиционирования физического оборудования, и применяемые средства геодезических измерений дают основание определить достижимую достаточную точность для вторичных сетей по результатам уравнивания в пределах  $\pm 0,07$  мм [6–8].

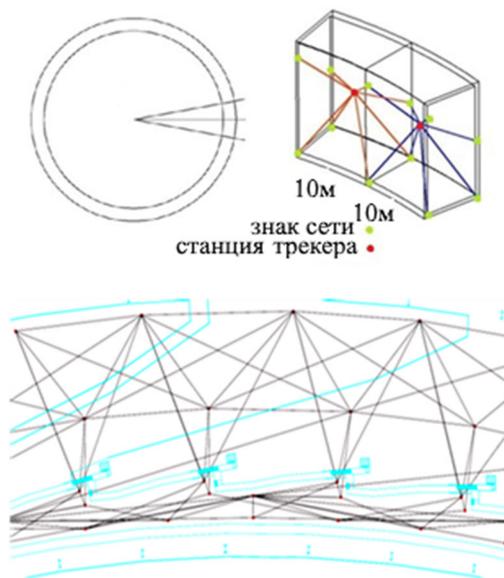


Рис. 3. Фрагмент вторичной сети накопителя и выводов СИ

Плотность сети составляет 0,4–0,8 пункта на погонный метр тоннеля. Термостатирование помещений комплекса и соблюдение принятых схем и методов измерений предполагают обеспечение равной точности от цикла к циклу, что необходимо для оценки стабильности сети.

Общий вид геодезических знаков вторичных сетей с магнитным держателем отражателя представлен на рис. 4. Предварительная оценка количества знаков вторичных сетей: линак  $\sim 30$ ; бустер  $\sim 120$ ; основное кольцо  $\sim 350$ ; выходы СИ  $\sim 250$ , перепускные каналы  $\sim 100$ .



Рис. 4. Геодезические знаки с магнитным держателем отражателя

На основании требований, определенных физическим проектом комплекса «СКИФ», и расположения гирдерных модулей суперпериода основного кольца выполнено матема-

тическое моделирование сети. Иллюстрация варианта геодезической сети накопителя и один суперпериод магнитной структуры представлены на рис. 5.

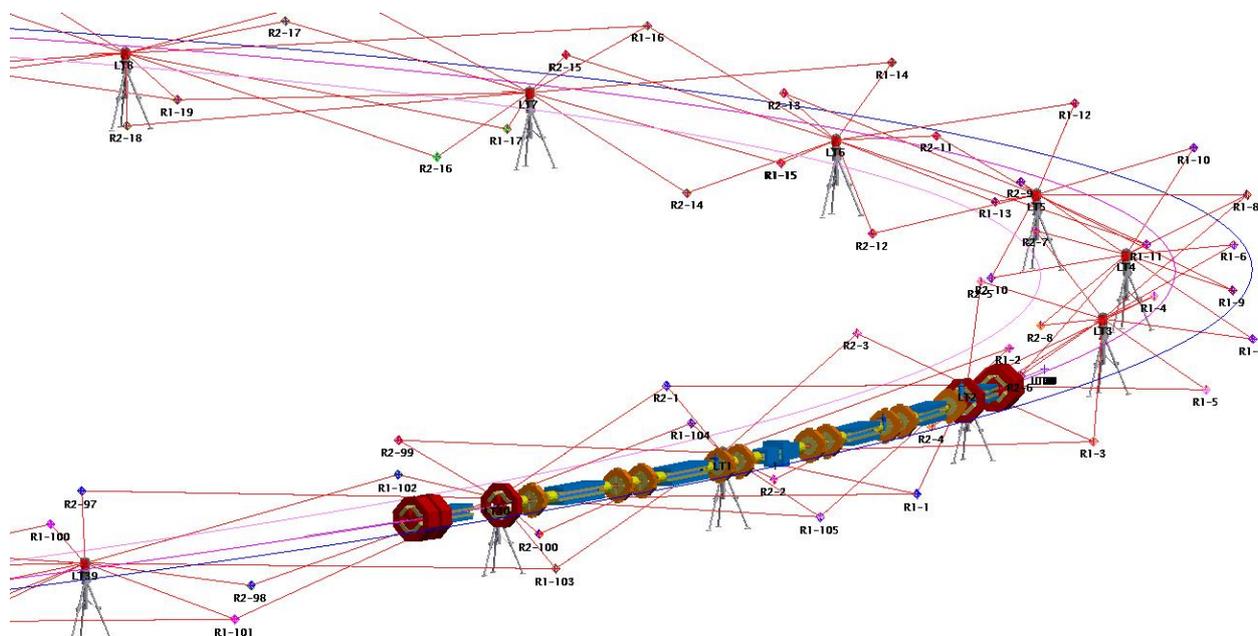


Рис. 5. Иллюстрация моделируемой опорной сети накопителя

Технологический процесс работы ускорительно-накопительного комплекса протекает в гармоническом режиме. Для циклических ускорителей в устойчивой периодичной фокусирующей системе частица совершает колебания около положения равновесной орбиты. Поперечные колебания частиц называют бетатронными, а число этих колебаний на длине оборота – бетатронной частотой. Анализ показывает, что в кольцевых ускорителях неоднородность поля приводит к раскачке колебаний и возникновению попереч-

ных резонансов. Поэтому возмущение, вызванное ошибкой установки магнитных элементов не должно содержать гармонических функций с частотами, близкими к частоте бетатронных колебаний [9].

Для накопителя частота бетатронных колебаний 17,6. Максимальные амплитуды возмущения будут принадлежать гармоникам, кратным 16–18 [10]. Спектральный состав погрешностей определения координат знаков сети имеет наибольшие амплитуды у первых четырех гармоник (рис. 6).

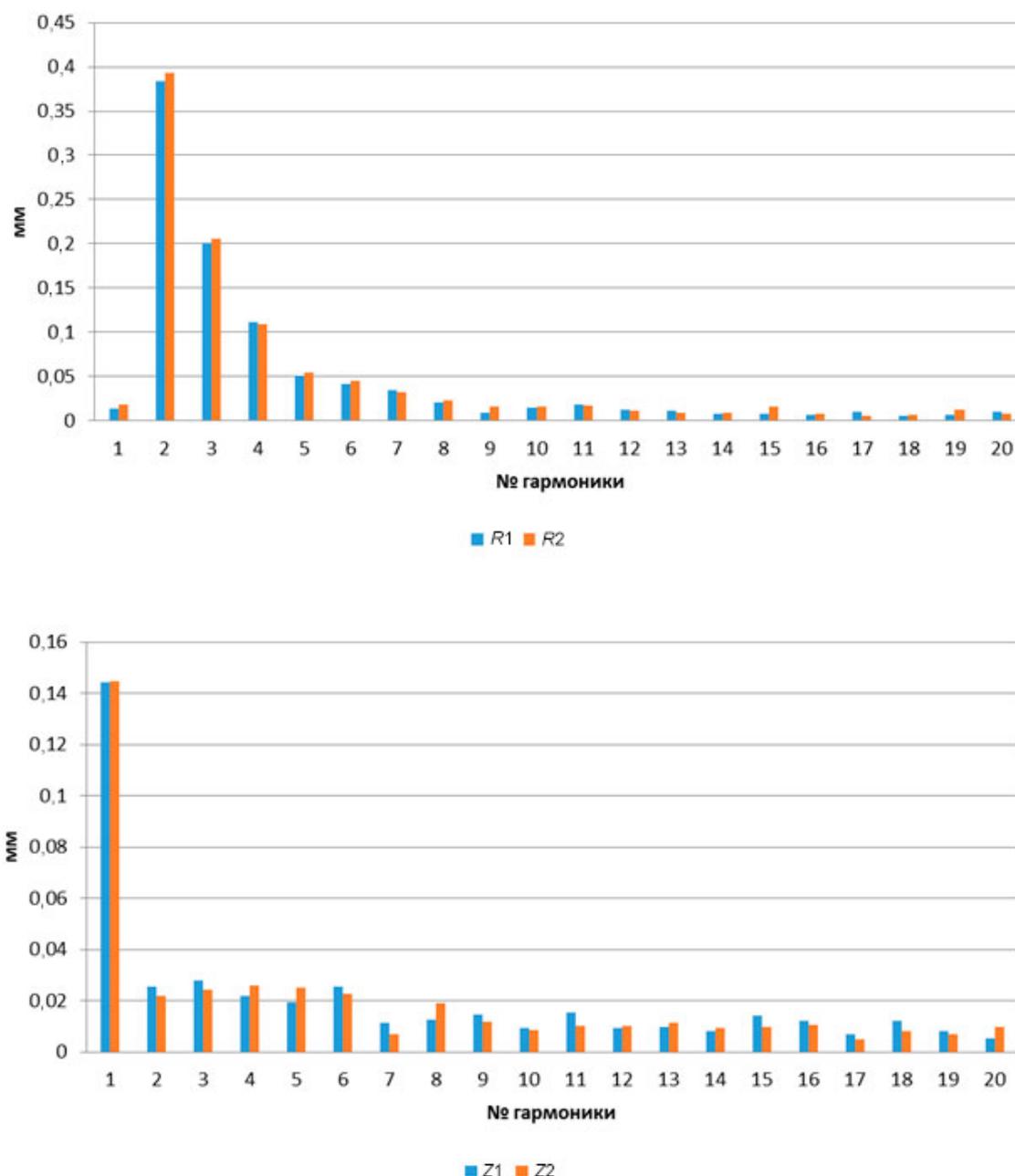


Рис. 6. Спектральный состав погрешностей определения координат моделируемой сети накопителя:

R1, Z1 – по внешней стене тоннеля; R2, Z2 – по внутренней стене тоннеля

Стадия монтажа физического оборудования современных источников СИ требует наличия термостатированных помещений для геодезического контроля сборки магнитной структуры на гирдерах [11, 12]. Для накопителя требуемая точность позиционирования элементов на гирдере  $\pm 0,03$  мм. Точность позиционирования гирдера относительно соседних гирдеров  $\pm 0,1$  мм [11]. Геометрические параметры орбиты заданы физическим проек-

том. Проектная орбита определяется узловыми точками, для каждого элемента это вход, центр и выход, (рис. 7). Каждая точка помимо трех координат имеет уникальное имя в структуре [13]. Все элементы паспортизируются при проведении совместных магнитных и геодезических измерений, на основании которых создается каталог фактических координат узловых точек и геодезических знаков в локальной системе координат элемента.

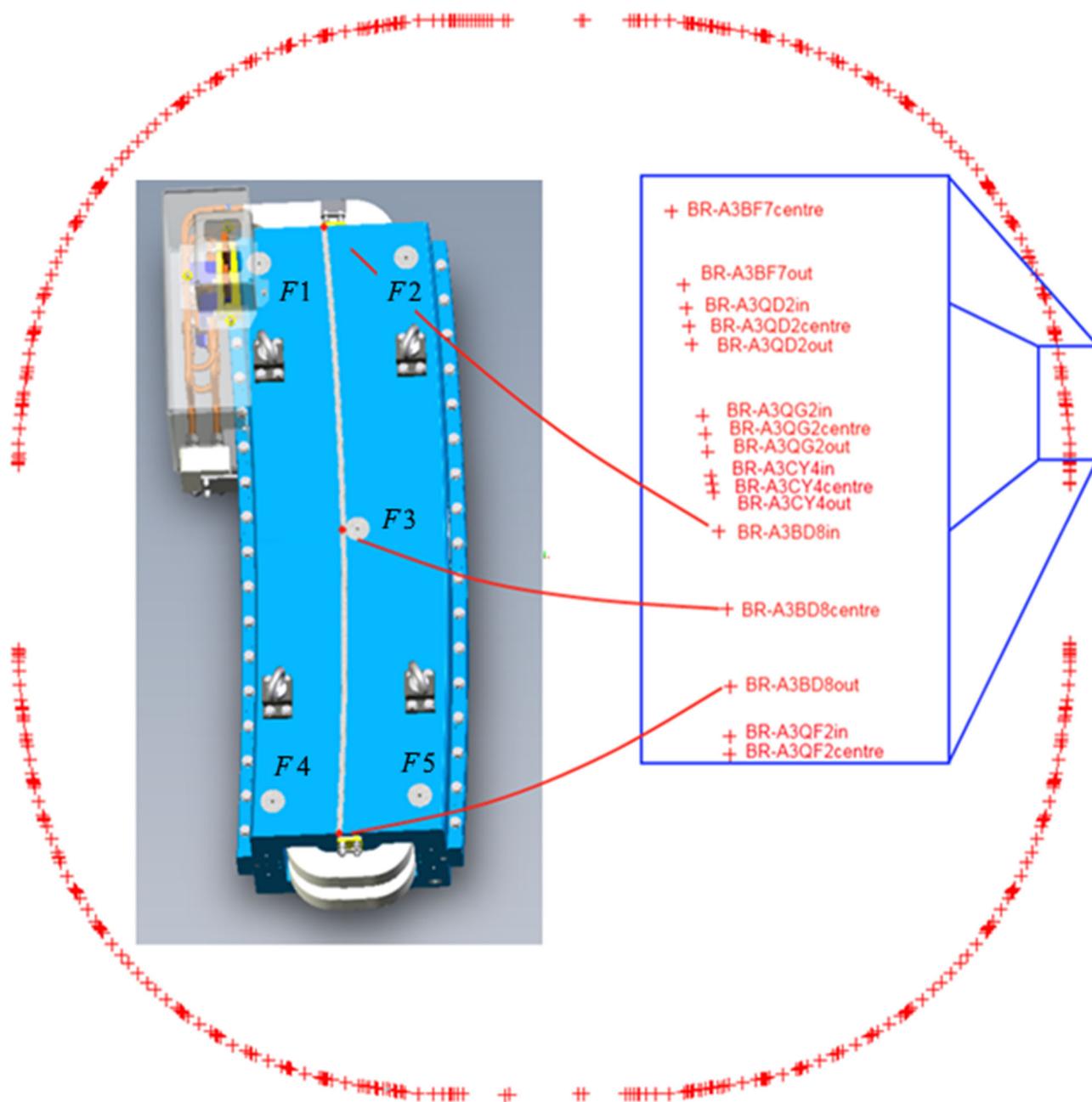


Рис. 7. Расположение элементов на проектной орбите бустера:

F1–F5 – геодезические знаки на магнитном элементе; BR-A3... – узловые точки орбиты

Далее, в среде программного обеспечения Spatial Analyzer, проводится оптимизация пространственного положения измеренных точек орбиты локального элемента относительно проектных в системе координат физической установки [14]. Полученные после оптимизации координаты геодезических знаков составляют каталог, используемый при высокоточном монтаже. Современ-

ное программное обеспечение позволяет с минимальными затратами времени решать задачи пересчета координат из множества локальных систем магнитных элементов в систему координат ускорителя. Геодезическое обеспечение стадий создания комплекса формируется на основе исходных данных и принятых технических решений. Их состав представлен в табл. 2.

Геодезическое обеспечение стадий создания комплекса

Стадии	Исходные данные	Технические решения	Геодезическая составляющая
Проектирование	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Каталог координат узловых точек орбиты пучка.</li> <li>2. Технические характеристики магнитных элементов.</li> <li>3. Спектральная чувствительность магнитной структуры</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Количество и габариты гирдеров.</li> <li>2. Рабочие диапазоны и конструкция юстировочных узлов .</li> <li>3. Конструкция гирдеров адаптированная для геодезического контроля</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оптимизация количества и расположения геодезических знаков на элементах.</li> <li>2. Моделирование опорной геодезической сети для оптимизации по спектральному составу ошибок определения координат</li> </ol>
Изготовление	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Точности в техническом задании.</li> <li>2. Каталог координат узловых точек орбиты пучка</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конструкция ступелей и кареток для магнитных измерений адаптированная для геодезического контроля</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создание опорных сетей ступелей.</li> <li>2. Определение взаимного положения геодезических знаков и магнитной оси элемента.</li> <li>3. Создание каталога координат геодезических знаков элементов.</li> <li>4. Геодезический контроль изготовления гирдеров</li> </ol>
Монтаж	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Каталог координат геодезических знаков магнитных элементов.</li> <li>2. Проект размещения и компоновки физического оборудования ускорителя</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Количество и расположение геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя.</li> <li>2. Технология сборки модулей</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Создание опорной геодезической сети в тоннеле ускорителя.</li> <li>2. Геодезическое обеспечение сборки модулей.</li> <li>3. Геодезическое обеспечение монтажа модулей в тоннеле</li> </ol>

### Заключение

Высокая точность геодезических работ при монтаже технологического оборудования уникальных сооружений достигается применением высокоточных измерительных средств, а также специального оборудования и методов, уменьшающих влияние различных источников ошибок. При создании вторичных геодезических сетей ускорителей, ориентированных на применение лазерных трекеров, сеть целесообразно создавать в виде пространственных линейно-угловых построений с высокой плотность пунктов сети.

Наиболее важными факторами системы геодезического контроля являются комплексный подход к решению задач, а также применение принципов системности, стандартизации, оптимальности, динамичности, преемственности, адаптации [15] на всех стадиях создания комплекса «СКИФ».

Для современных источников СИ с малым эмиттансом соблюдение требований к геометрическим параметрам и стабильности орбиты становится приоритетным. Геодезическое обеспечение проекта на всех стадиях является необходимым условием его успешной реализации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gurov S. M., Burenkov D. B., Karnaeв S. E., Serdakov L. E. et al. Status of NSLS-II booster // Physics Procedia. Ser. Proceedings of the International Conference «Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application». – SFR. – 2016. – P. 74–81.
2. Полянский А. В. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа : дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – 118 с.
3. Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 3–6.
4. Медведская Т. М. Исследование точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 56–65.
5. Карпик А. П., Чешева И. Н. Исследование и анализ точности специальных инженерно-геодезических сетей методом математического моделирования : метод. указания. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 32 с.
6. Сердаков Л. Е., Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В. О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 22–25.
7. Сердаков Л. Е., Мурзинцев П. П., Полянский А. В. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 2–6.
8. Dale J., Reichold A. Simulation of the Alignment of Linear Accelerators // Particle accelerator. Proceedings, 23rd Conference, PAC 09, May 4–8. – Vancouver, Canada, 2009.
9. Пупков Ю. А., Протопопов И. Я., Скринский А. Н. Система допусков на установку магнитов ускорителей на большие энергии // Геодезические работы при монтаже и эксплуатации технологического оборудования : материалы научн.-техн. конф. – Новосибирск, 1978. – С. 99–103.
10. Сердаков Л. Е. Разработка методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения : дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 117 с.
11. Сердаков Л. Е., Мартин Д., Мурзинцев П. П. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8.
12. Precision Alignment of Multipoles on a Girder for NSLS-II // Animesh Jain. – 17th International Magnetic Measurement Workshop (IMMW17), 18–23 September. – Barcelona, Spain, 2011.
13. Буренков Д. Б. Разработка методики геодезического контроля изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов с использованием APILaserTracker 3 : дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 142 с.
14. Spatial Analyzer. User manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/SA%20User%20Manual%202021.2.pdf>.
15. Жуков Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий : монография. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.

### Об авторах

*Андрей Викторович Полянский* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

*Владимир Сергеевич Крапивин* – старший инженер.

*Денис Борисович Буренков* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

*Елена Сергеевна Вонда* – инженер.

*Леонид Евгеньевич Сердаков* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Получено 14.02.2022

© А. В. Полянский, В. С. Крапивин, Д. Б. Буренков,  
Е. С. Вонда, Л. Е. Сердаков, 2022

## The alignment strategy for the Skif synchrotron radiation source

A. V. Polyansky<sup>1</sup>, V. S. Krapivin<sup>1</sup>, D. B. Burenkov<sup>1</sup>, E. S. Vonda<sup>1</sup>, L. E. Serdakov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences  
(BINP SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: naufan@ngs.ru

**Abstract.** Synchrotron radiation sources are technically complex «MegaScience» facilities. The pilot project Siberian Ring Photon Source (SKIF) being implemented in the Novosibirsk Region is the first of the projected specialized synchrotron sources of the fourth generation in the country. The purpose of geodetic support of this project is to comply with the requirements for the mutual position of the electromagnetic axes of the elements during the installation of the complex, determined by the design physical parameters. The article presents the characteristics of the accelerator-storage complex, the main tasks of geodetic support for the project implementation stages and the principles of their solution. To create a geodetic basis, the approach of two-stage construction of support networks was chosen. Data on the number of geodetic signs of networks, measurement schemes and the results of the analysis of the simulated storage network are presented.

**Keywords:** design, survey reference network, accelerator-storage complex, synchrotron light source, geodetic support, high-precision installation, girder module

### REFERENCES

1. Gurov, S. M., Burenkov, D. B., Karnaev, S. E., Serdakov, L. E., & et al. (2016). Status of NSLS-II booster. *Physics Procedia. Series. Proceedings of the International Conference "Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application"*, SFR (pp. 74–81).
2. Polyansky, A. V. (2015). Development of a methodology for geodetic support for the construction and operation of an accelerator-storage complex based on harmonic analysis. *Candidate's thesis*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 118 p. [in Russian].
3. Burenkov, D. B., Murzintsev, P. P., Polyansky, A. V., Pupkov, Yu. A., & Serdakov, L. E. (2013). Geodetic support for creating a booster for NSLS-II. *Geodezia i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 3–6 [in Russian].
4. Medvedskaya, T. M. (2019). Study of accuracy of reference networks for geodetic monitoring of large-size industrial machinery. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 56–65 [in Russian].
5. Karpik, A. P., & Chesheva, I. N. (2009). *Issledovanie i analiz tochnosti spetsial'nykh inzhenerno-geodezicheskikh setey metodom matematicheskogo modelirovaniya [Research and analysis of the accuracy of special engineering geodetic networks using mathematical modeling]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 32 p. [in Russian].
6. Serdakov, L. E., Burenkov, D. B., Murzintsev, P. P., & Polyansky, A. V. (2019). On the choice of the location of laser tracker stations for the installation of technological equipment. *Geodezia i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 11, 22–25 [in Russian].
7. Serdakov, L. E., Murzintsev, P. P., & Polyansky, A. V. (2017). On the optimization of reference geodesic ring networks of accelerators using laser trackers. *Geodezia i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 2–6 [in Russian].
8. Dale, J., & Reichold, A. (2009). Simulation of the Alignment of Linear Accelerators [Text] / J. Dale. *Particle accelerator. Proceedings of 23rd Conference, PAC 09*. Vancouver, Canada.
9. Pupkov, Yu. A., Protopopov, I. Ya., & Skrinsky, A. N. (1978). The system of tolerances for the installation of magnets for high-energy accelerators. In *Sbornik materialov nauchno-tehnicheskoy konferentsii: Geodezicheskie raboty pri montazhe i ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya [Proceedings of Scientific and Technical Conference: Geodetic Work During the Installation and Operation of Technological Equipment]* (pp. 99–103). Novosibirsk [in Russian].
10. Serdakov, L. E. (2020). Development of a method of geodetic support for the installation of technological equipment for synchrotron radiation sources. *Candidate's thesis*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 117 p. [in Russian].
11. Serdakov, L. E., Martin, D., & Murzintsev, P. P. (2018). Geodetic support at the stages of assembly and operation of the upgraded source of synchrotron radiation ESRF. *Geodezia i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 11, 2–8 [in Russian].

12. Animesh, J. (2011). Precision Alignment of Multipoles on a Girder for NSLS-II. *17th International Magnetic Measurement Workshop (IMMW17)*. Barcelona, Spain.
13. Burenkov, D. B. (2016). Development of a technique for geodetic control of the manufacture and installation of elements of accelerator-storage complexes using API Laser Tracker 3. *Candidate's thesis*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 142 p. [in Russian].
14. Spatial Analyzer. User manual. (n. d.). retrieved from <https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/SA%20User%20Manual%202021.2.pdf>.
15. Zhukov, B. N. (2003). *Geodezicheskiy kontrol' sooruzheniy i oborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy [Geodetic control of structures and equipment of industrial enterprises]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 356 p. [in Russian].

#### Author details

*Andrey V. Polyansky* – Ph. D., Senior Researcher.

*Vladimir S. Krapivin* – Senior Engineer.

*Denis B. Burenkov* – Ph. D., Senior Researcher.

*Elena S. Vonda* – Engineer.

*Leonid E. Serdakov* – Ph. D., Senior Researcher.

Received 14.02.2022

© *A. V. Polyansky, V. S. Krapivin, D. B. Burenkov,  
E. S. Vonda, L. E. Serdakov, 2022*