

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НОЖА ФУКО ДЛЯ АДАПТАЦИИ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

Пётр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, директор, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Максим Сергеевич Кравченко

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-59-40, e-mail: max@tdisie.nsc.ru

Елена Сергеевна Жимулева

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)306-59-40, e-mail: slena@tdisie.nsc.ru

В процессе развития космических телескопов происходит увеличение диаметра их рефлектора. При этом, чаще используются составные рефлекторы. Так, главное зеркало обсерватории «Миллиметрон» будет состоять из 96 элементов, каждый из которых может отклоняться от расчетного положения в процессе перехода в транспортное положение и обратно в рабочее при выводе телескопа на орбиту. В данной работе рассматривается возможность использования метода ножа Фуко для решения задачи адаптации зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон». В работе предложена оптическая схема для решения задачи адаптации. Проведено ее моделирование в программном пакете Zemax. В процессе моделирования исследовались эффекты, возникающие при отклонении всех составных частей рефлектора по 6 степеням свободы. Продемонстрировано преимущество подхода с установкой цифровой матрицы в плоскость выходного зрачка телескопа.

Ключевые слова: нож Фуко, обсерватория «Миллиметрон», адаптация оптической системы, трассировка лучей, метод Монте-Карло.

FOUCAULT KNIFE-EDGE METHOD APPLICATION FOR ADAPTATION OF THE MILLIMETRON OBSERVATORY MIRROR SYSTEM

Peter S. Zavyalov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Maxim S. Kravchenko

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Junior Researcher, phone: (383)306-59-40, e-mail: max@tdisie.nsc.ru

Elena S. Zhimuleva

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)306-59-40, e-mail: slena@tdisie.nsc.ru

In the process of space telescopes development there is an increase in the diameter of their reflector. In this case, composite reflectors are used more often. So the main mirror of the Millimetron observatory consists of 96 elements, each of which can deviate from the calculated position during the transition to the transport position and back to the working position when the telescope is put into orbit. In this paper, we consider the possibility of using Foucault knife-edge method to solve the problem of adapting the mirror system of the Millimetron observatory. An optical scheme for solving the adaptation problem is proposed. It was simulated in the Zemax software package. In the process of modeling, the effects arising from the deviation of all the components of the reflector in 6 degrees of freedom were studied. The advantage in the approach to the digital matrix in the telescope is highlighted.

Key words: Foucault knife-edge, «Millimetron» observatory, adaptation of the optical system, ray tracing, Monte-Carlo method.

Введение

В последнее время для астрономических исследований используются телескопы способные работать в условиях космического пространства, такие как «Спект-Р» [1], «Хабл» («Hubble») [2] и другие [3-5]. Сейчас в России ведется проектирование и разработка космической обсерватории «Миллиметрон» [6]. Этот телескоп предназначен для работы в диапазоне длин волн от 0,07 до 10 мм. Диаметр главного зеркала (ГЗ) составляет 10 м, что позволяет достичь углового разрешения $10^{-8} - 10^{-9}$ угловых секунд. Телескоп создается по схеме Кассегрена и имеет фокусное расстояние 70 м. ГЗ телескопа – параболическое, вторичное зеркало (ВЗ) – гиперболическое. ГЗ трансформируемое и состоит из 96 отдельных сегментов, каждый из которых будет иметь возможность адаптации по нескольким степеням свободы [7-8].

До вывода на орбиту «Миллиметрон», в том числе и ГЗ, находится в сложном положении, необходимом для транспортировки. За время перелета, при воздействии перегрузок и вибраций, элементы зеркальной системы могут сместиться из исходного положения. Система раскрытия (перевода зеркальной системы из транспортной конфигурации в рабочее состояние) не обеспечивает точного взаимного расположения элементов зеркальной системы. Для обеспечения оптимального режима работы телескопа требуется выставить его составные части с точностью порядка 10 мкм. Актуальным является вопрос адаптации ГЗ после вывода «Миллиметрона» в космическое пространство (в точку Лагранжа L_2). Процесс адаптации необходим для возвращения элементов ГЗ в рабочее состояние, в котором обеспечивается требуемое качество изображений в рабочем диапазоне длин волн. В данной работе будет рассмотрена возможность применения метода ножа Фуко для адаптации ГЗ «Миллиметрона», предложена оптическая схема для решения этой задачи, приведены результаты моделирования в программном пакете Zemax.

Методы и материалы

Методов для контроля форм оптических поверхностей астрономических зеркал существует большое множество. В данной задаче, контактные методы

рассматриваться не будут, так как их применение в условиях космического пространства затруднено. Бесконтактные методы можно разделить по принципу работы измерительного прибора на два типа: геометрические и волновые [9].

К волновым относится интерферометрический метод контроля. [10]. Однако, в интерферометрах в качестве осветителя используют лазер. Их использование в условиях космического аппарата требует расположения сложной аппаратуры (стабилизированного лазерного источника, цифровой камеры, высокоточной оптики) вне пределов спутника и вблизи первичного фокуса ГЗ. В условиях космического пространства не существует источников, соответствующих по характеристикам лазеру. Поэтому применение интерферометра на телескопе усложнено.

К геометрическим относятся теневые методы, которые могут быть подразделены на несколько типов: метод Фуко (шлирен-метод) [11], метод щели и нити [12], метод Ронки [13]. С точки зрения удобства использования в условиях космического аппарата наибольший интерес представляет метод ножа Фуко. Он основан на введении непрозрачного экрана с острым краем в фокус пучка, отраженного от поверхности исследуемого зеркала, например сферической. Источником света служит точечный источник. При установке непрозрачного экрана в фокальной плоскости, всё изображение зеркала будет освещено равномерно, так как все лучи, отраженные зеркалом, соберутся на экране. Если в конус лучей, отраженных от зеркала, вводить нож Фуко таким образом, чтобы он перекрыл только часть изображения источника, то изображение зеркала будет частично затенено, но также по всей поверхности одновременно. Важно, что в построении каждого участка изображения источника, даже если это изображение дифракционное, участвует вся поверхность исследуемого зеркала. Именно поэтому, какую бы часть изображения мы ни перекрыли, зеркало будет гаснуть одновременно по всей поверхности. Если ввести нож Фуко в конус лучей в предфокальном положении, часть зеркала станет затенена. Если нож введен справа, то погаснет правая часть, так как нож пересекает часть пучка, идущую от правой части зеркала. Тогда как, при введении ножа в фокальном положении справа становится затенена левая часть изображения зеркала.

Данный метод прост в реализации, не требует когерентных источников излучения. Его часто применяют при цеховом контроле оптики. Оптическая система, реализующая данный метод, компактна, при условии расположения вблизи вторичного фокуса телескопа (точка F_2 , рис. 1) [14].

Результаты

Для выполнения задачи адаптации зеркальной системы «Миллиметрона» предложена оптическая схема блока контроля (СК ЗС) на основе метода ножа Фуко (см. рис. 1). Оптическое излучение бесконечно удаленного источника отражается от ГЗ и вторичного зеркала и попадает на поворотное зеркало телескопа. Поворотное зеркало, в рабочем режиме, будет направлять излучение на ту систему регистрации, которая в данный момент должна использоваться. В процессе адаптации излучение направляется к СК ЗС.

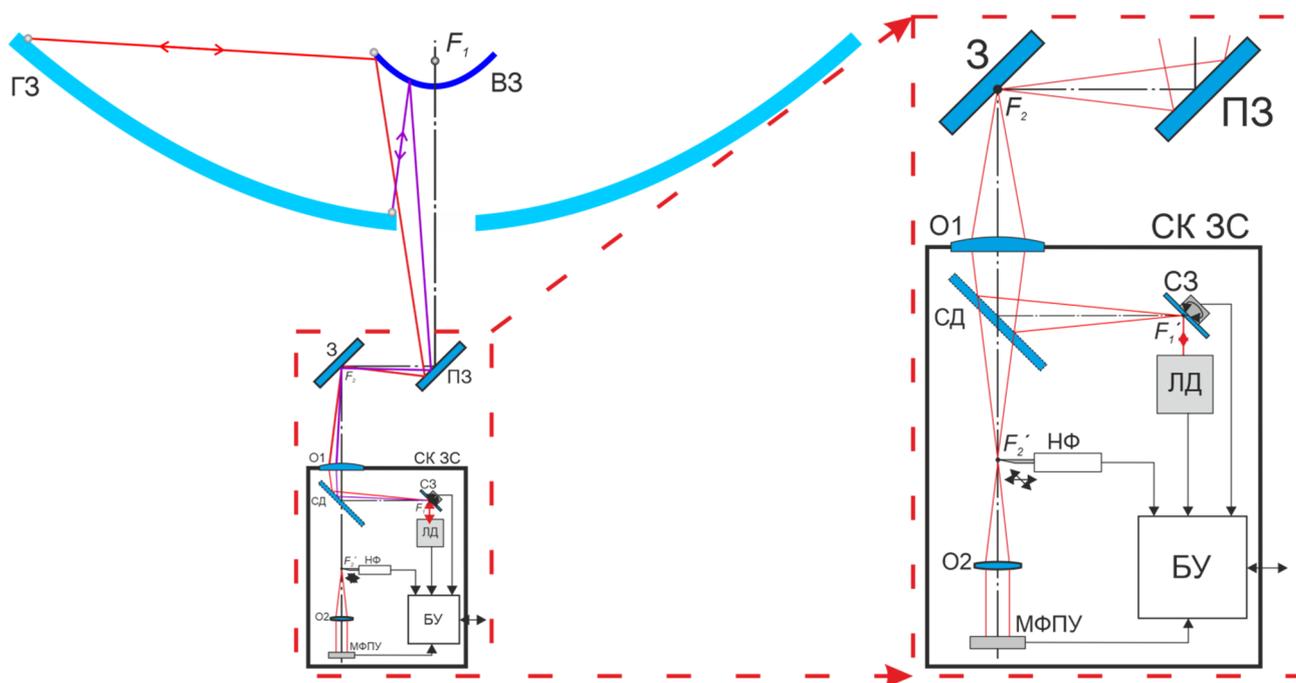


Рис. 1. Оптическая схема адаптации зеркальной системы «Миллиметр»:

ГЗ – главное зеркало, ВЗ – вторичное зеркало, F_1 – первичный фокус телескопа, F_2 – вторичный фокус телескопа, F_2' – изображение вторичного фокуса телескопа, ПЗ – поворотное зеркало телескопа, З – зеркало, О1, О2 – объективы; СД – светоделитель, СЗ – сканирующее зеркало, ЛД – лазерный дальномер, НФ – нож Фуко, МФПУ – цифровая матрица, БУ – блок управления

Для реализации метода ножа Фуко необходимо, чтобы сканирование ножами Фуко производилось в фокусе телескопа. Конструкция телескопа не позволяет расположить ножи Фуко непосредственно в точке вторичного фокуса. Поэтому, в составе СК ЗС предусмотрен объектив О1, который переносит изображение из точки фокуса телескопа F_2 в плоскость ножей Фуко F_2' , расположенную внутри СК ЗС.

Объектив О2 формирует изображение ГЗ на цифровой матрице. Изображения регистрируются и обрабатываются блоком управления, который затем выдает сигналы на корректировку положения зеркальных элементов в систему адаптации.

Для иллюстрации работы СК ЗС создана математическая модель оптической схемы адаптации зеркальной системы «Миллиметр» в программном пакете Zemax. Проводилась трассировка лучей от удаленного точечного источника на рабочей длине волны (300 мкм) таким образом, что на ГЗ падала плоская волна. После отражения от всех элементов ГЗ излучение попадало на ВЗ, затем через вторичный фокус телескопа попадало в СК ЗС. Модель построена таким образом, что каждый из 96 элементов ГЗ может быть децентрирован и наклонен по шести степеням свободы. По методу Монте-Карло для каждого элемента ГЗ сгенерированы случайные величины отклонений. Результаты мо-

делирования в виде изображений в плоскости ножа Фуко приведены на рис. 2. Максимальные значения для рис. 2, *а* составляли: децентрировки 0,1 мм и наклоны $0,002^\circ$; для рис. 2, *б* составляли: децентрировки), 5 мм и наклоны $0,01^\circ$. Цифровая матрица как на рис. 2, так и на всех последующих рисунках, имеет размеры 40×40 мм. Видно большое количество бликов от разных элементов ГЗ, при этом идентифицировать какой блик от какого элемента ГЗ крайне затруднительно.

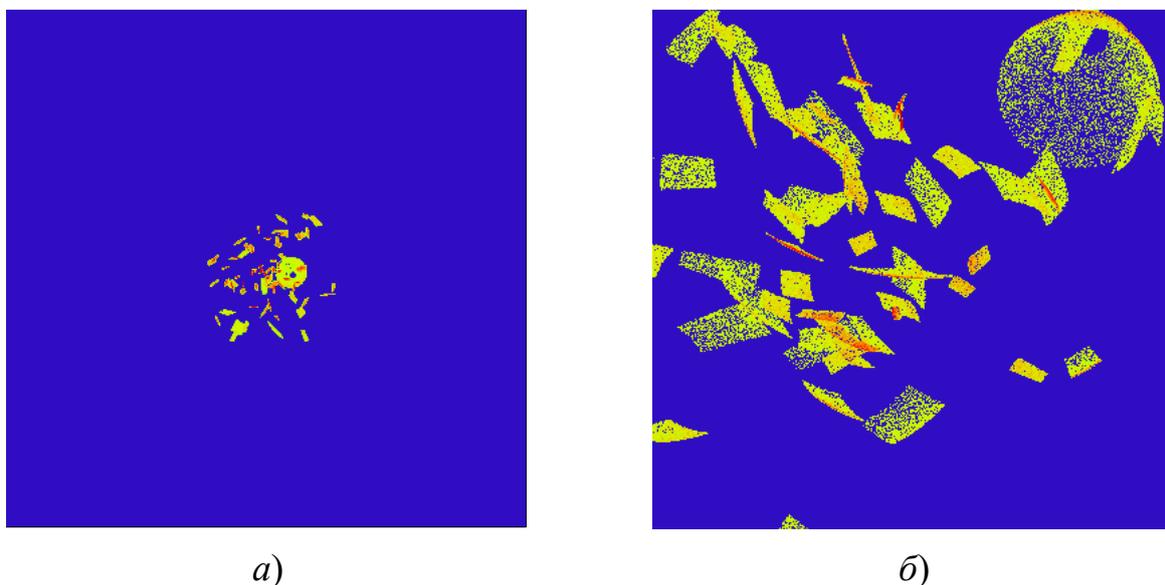


Рис. 2. Изображения в плоскости вторичного фокуса «Миллиметра»
а) отклонения элементов ГЗ: децентрировки 0,1 мм, наклоны $0,002^\circ$; *б*) отклонения элементов ГЗ: децентрировки 0,5 мм, наклоны $0,01^\circ$

Если же установить цифровую матрицу в плоскости выходного зрачка, то на изображении каждый элемент ГЗ будет иметь свое место, которое не изменится в процессе юстировки. На рис. 3 представлено модельное изображение ГЗ, называемое так же фукограммой, соответствующее случаю на рис. 2, *а*. Он либо освещен, либо затенен в зависимости удаленности ножа от фокуса. Нож Фуко перекрыл нижнюю половину изображения. Соответствующие зеркальные элементы, пятна от которых отсеклись ножом Фуко, погасли на фукограмме. Таким образом, на полученных при сканировании изображениях отслеживается изменение яркости отдельных сегментов ГЗ в зависимости от положения ножа Фуко.

Для демонстрации работы метода ножа Фуко смоделирована система, в которой блики от всех элементов ГЗ сфокусированы в фокальной плоскости в пятно диаметром 5 мм. При установке ножа Фуко во вторичный фокус F_2' со смещением (позиция ножа Фуко 3, рис. 4), все лучи от ГЗ попадают на цифровую матрицу, установленную в выходном зрачке телескопа. При этом освещены все элементы ГЗ.

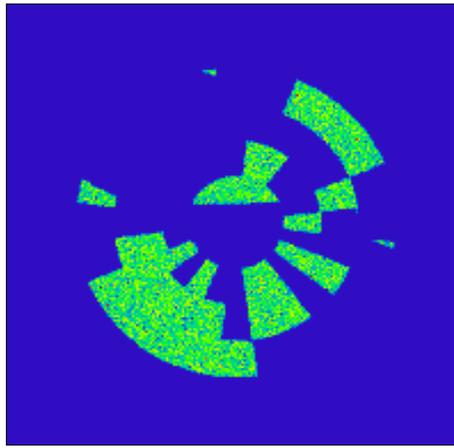


Рис. 3. Изображение в плоскости выходного зрачка «Миллиметра»

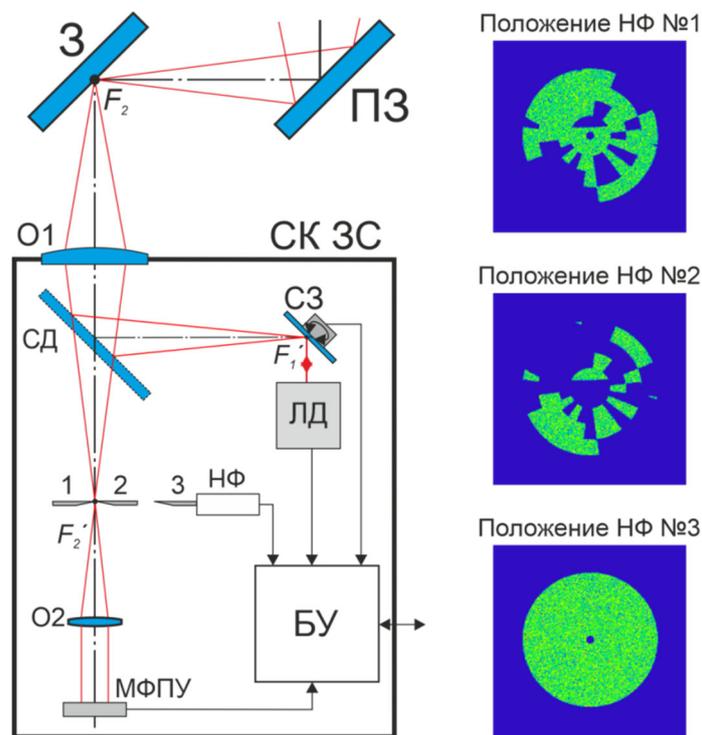


Рис. 4. Демонстрации работы метода ножа Фуко

F_2 – вторичный фокус телескопа, F_2' – изображение вторичного фокуса телескопа, ПЗ – поворотное зеркало телескопа, З – зеркало, O1, O2 – объективы; СД – светодетектор, СЗ – сканирующее зеркало, ЛД – лазерный дальномер, НФ – нож Фуко, МФПУ – цифровая матрица, БУ – блок управления

Установка ножа Фуко в позиции 1 и 2 (рис. 4) позволяет получить инвертированные друг относительно друга изображения 1 и 2. Таким образом, при установке ножа Фуко в фокус телескопа нефокусированные элементы ГЗ будут затенены. Выполнив сканирование пучка ножом Фуко в фокальной плоскости можно получить информацию о положении каждого элемента ГЗ.

Заключение

В работе рассмотрена задача адаптации зеркальной системы «Миллиметрон». Проведен анализ известных методов контроля астрономических зеркал большого диаметра. Для реализации выбран метод ножа Фуко, так как он не требует использования когерентных источников излучения, прост и надежен, что является необходимым условием для оборудования, предназначенного для работы в космическом пространстве. На основе выбранного метода разработана оптическая схема для решения задачи адаптации ГЗ с помощью СК ЗС. Ключевой особенностью схемы является установка цифровой матрицы в плоскость выходного зрачка системы.

Выполнено моделирование предложенной оптической схемы в программном пакете Zemax, при котором каждый элемент схемы отклонялся по шести степеням свободы случайным образом в пределах децентрировки 0,5 мм и наклона 0,01° (по методу Монте-Карло). Приведены результаты моделирования, позволяющие сделать вывод о применимости метода ножа Фуко для решения задачи адаптации.

Следующим шагом будет выбор подходящей звезды для настройки «Миллиметрона». Кроме того, необходимо провести моделирование работы СК ЗС с неидеальными зеркалами телескопа, имеющими определенную шероховатость. Для анализа изображений, полученных в результате моделирования, необходимо разработать алгоритмы их обработки. Создание опытного образца системы, реализующей метод ножа Фуко, выполняется при непосредственном участии авторов данной работы. В последующем планируется создание и испытание опытного образца СК ЗС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Международный космический РСДБ проект РадиоАстрон [Электронный ресурс]. URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html> (дата обращения: 13.04.2020).
2. Hubble Space Telescope [Электронный ресурс]. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html (дата обращения: 13.04.2020).
3. Galaxy Evolution Explorer (GALEX) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.galex.caltech.edu/> (дата обращения: 13.04.2020).
4. James Webb space telescope Goddard space flight center [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jwst.nasa.gov/> (дата обращения: 13.04.2020).
5. Herschel science centrehome [Электронный ресурс]. URL: <http://herschel.esac.esa.int/> (дата обращения: 13.04.2020).
6. Космическая обсерватория Миллиметрон [Электронный ресурс]. URL: <http://millimetron.ru/index.php/ru/> (дата обращения: 13.04.2020).
7. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон / Кардашёв Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др. // УФН. 2014. 184. С. 1319–1352.
8. Отработка и настройка опорной системы крупногабаритного рефлектора / Зырянова П.С., Усольцев А.В., Козлов А.В. и др. // Решетневские чтения : материалы XXI Междунар. науч. конф. (08–11 ноября 2017, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ.ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. Ч. 1. – С. 125–126.
9. Э.А. Витриченко. Методы исследования астрономической оптики. – М. : Наука, 1980. – С. 152.

10. Батшев В. И. Оптические системы, свойства и методы контроля асферических поверхностей большого диаметра: диссертация кандидата технических наук: 05.11.07; [Место защиты: Москв. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана]. – М., 2010.
11. Сикорук Л.Л. Телескопы для любителей астрономии. Главная редакция физико-математической литературы. – М. : Наука, 1982.
12. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – Л.; М. : ОГИЗ-Гостехиздат, 1948.
13. Ronchi V. Lefrangedicombinazioneinlostudiodellesuperficieeedeisistemiottici [Combinationfringesinthestudyofsurfacesandopticalsystems], Rivistad’OtticaeMeccanicadirecision [JournalofOpticsandPrecisionMechanics], 1923.vol. 2. – pp. 9–35.
14. Завьялов П. С., Жимулева Е. С. Контроль и адаптация зеркальной системы обсерватории «Миллиметрон» методом ножа Фуко //материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева, 11–15 ноября 2019, г. – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. Ч. 1. С. 99-101.

© П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, Е. С. Жимулева, 2020