

УДК 520.88

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ТЕЛЕСКОПА В КИСЛОВОДСКЕ***Андрианов Н. Г.<sup>1</sup>, Толстов А. А.<sup>2</sup>***EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF OPTICAL MEASUREMENTS WITH THE TELESCOPE IN KISLOVODSK**

Andrianov N. G., Tolstov A. A.

The article is concerned to accuracy estimation of the optical observations realized in Kislovodsk observatory. For accuracy estimation etalon satellites were considered which orbits are known with great precision due to laser measurements. The influence on the measurement accuracy of main disturbing factors is considered.

Keywords: optical satellite observations, optical observation precision, etalon satellites.

Настоящая работа посвящена оценке точности оптических наблюдений, проводимых в Кисловодской обсерватории. Для оценки точности использовались наблюдения эталонных спутников, орбита которых известна с большой точностью из лазерных измерений.

Перед использованием оптических измерений, необходимо проверить их точность и правильность всех этапов обработки оптической информации, получаемой телескопами. Основными задачами в наблюдении спутников с помощью оптики является, выделение треков спутников и определение положения спутника на кадре, определение точного времени, выделение звезд на кадре и привязка к карте звездного неба, получаемого из звездного каталога, определение угловых координат отметки от спутника из привязки по звездам. По полученным угловым координатам проводится идентификация объекта с имеющимся каталогом и уточнение орбиты. На точность оптических измерений влияет каждый из следующих факторов:

- яркость объекта и точность выделения трека;
- точность определения времени;
- точность привязки к карте звездного неба;
- характеристики оборудования: поле зрения, тип матрицы, разрешение;

– учет различных искажений: рефракция, аберрации, задержка по времени.

**1. Исходные данные**

Измерения с телескопа в Кисловодске (рис. 1) собираются на сервере обработки в Москве. Для дальнейшей обработки измерений проводится обнаружение трека наблюдаемого объекта и его идентификация, которая заключается в сопоставлении обнаруженного объекта с каталогом спутников. Чем больше и точнее каталог спутников, тем выше вероятность корректно сопоставить трек со спутником. Некоторые измерения не удается идентифицировать. Это может быть обусловлено отсутствием такого спутника в каталоге, либо орбита из каталога не совпадает с реальной орбитой этого объекта вследствие маневра спутника или устаревания данных в каталоге.

На сервере реализован автоматический сбор измерений с телескопов и первичная обработка информации. Схема обработки представлена на рис. 2.

После прихода новых измерений на сервер, запускается программа обработчик измерений. Сначала обновляются данные по имеющимся каталогам спутников TLE, изменения заносятся в базу. Новые измерения

<sup>1</sup>Андрианов Николай Григорьевич, инженер ОАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»», преподаватель кафедры информационных систем Московского физико-технического института; e-mail: andrianovng@gmail.com.

<sup>2</sup>Толстов Андрей Александрович, инженер ОАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»», e-mail: atolst@yandex.ru



Рис. 1. Телескоп для наблюдения, установленный в Кисловодской обсерватории

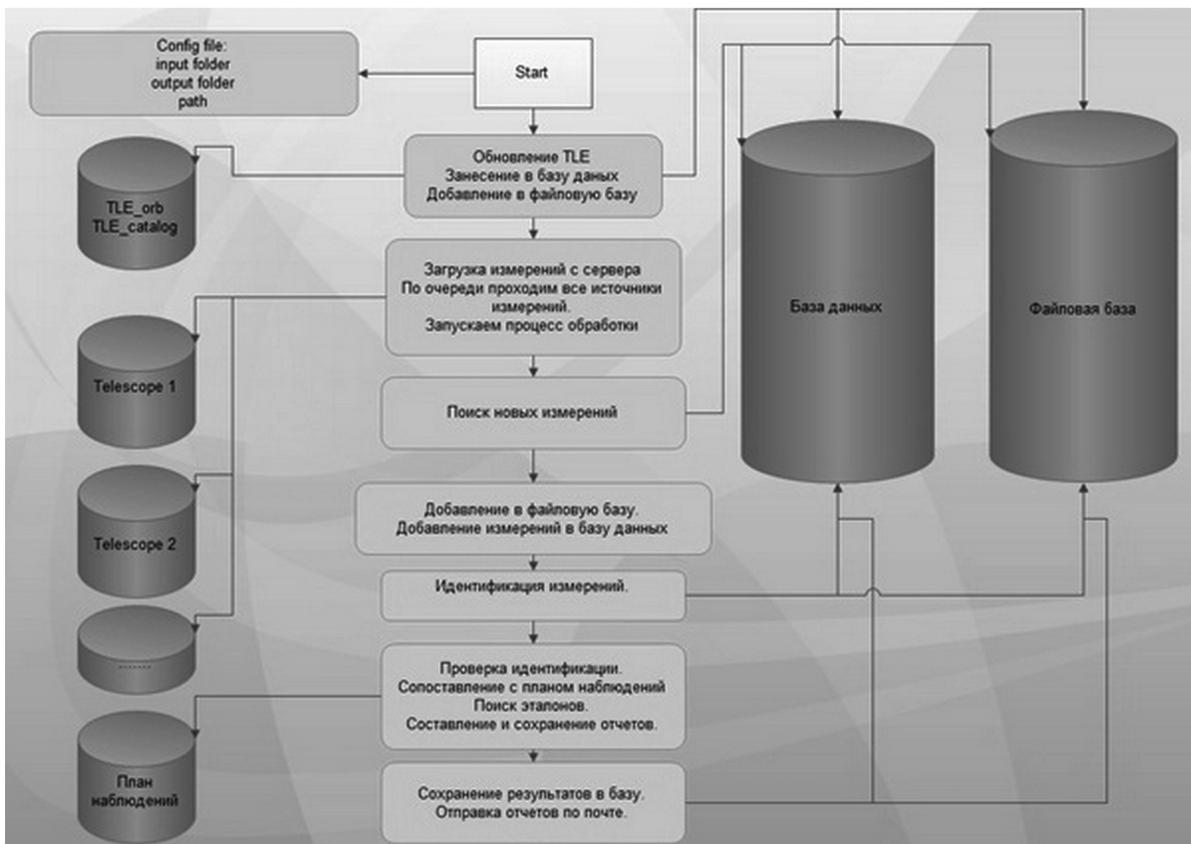


Рис. 2. Алгоритм первичной обработки измерений в центре обработки

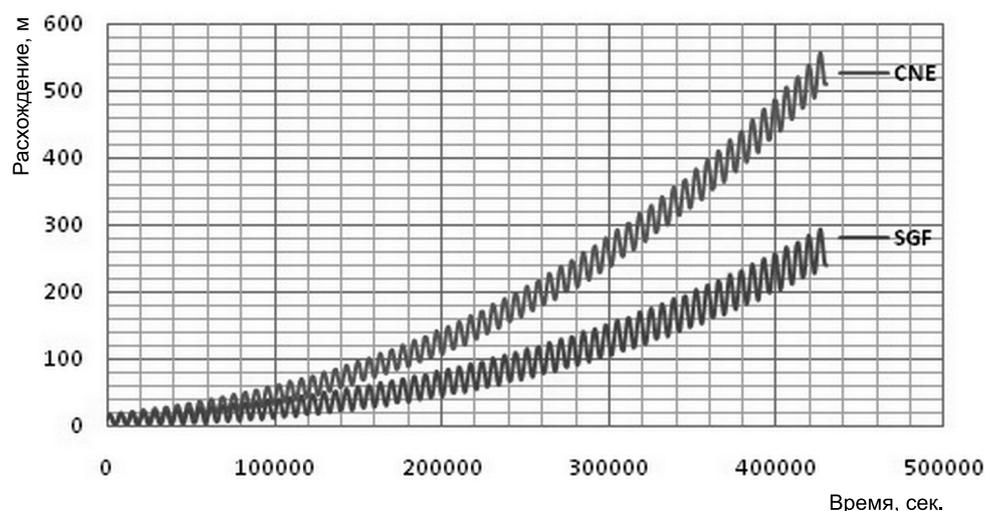


Рис. 3. Точность целеуказаний

Таблица 1. Расхождение оптических измерений с точными координатами спутника

dRa	dDec	Продольная ошибка	Поперечная ошибка	Зенитный угол
-10,43	-9,74	14,08	2,33	41,31
-5,83	-7,05	8,72	2,77	41,73
-13,83	-10,99	17,27	3,70	45,13
-17,26	-11,33	20,46	2,82	45,68
-19,02	-10,65	21,46	3,80	49,68
-19,25	-10,56	21,59	3,97	50,27
-25,86	-11,72	27,80	5,76	54,40
-25,19	-9,93	26,70	4,52	54,99

и идентифицируются с каталогом, результаты поверяются и сравниваются с поставленным планом наблюдений и списком эталонов, формируются и сохраняются отчеты. Необходимые отчеты рассылаются по почте. В план наблюдений были добавлены эталонные спутники и по ним были получены оптические измерения. По этим измерениям и были проведены эксперименты по определению точности измерений.

Для оценки точности использовались эталонные спутники, орбита которых известна с высокой точностью из лазерных измерений. По лазерным измерениям орбиты строятся таблицы целеуказаний в системе координат, связанной с землей, через равные короткие промежутки времени. Шаг целеуказаний по времени составляет несколько минут. Такие списки целеуказаний выдают небольшое число лабораторий из разных стран. Для получения положения спутника из целеуказаний на интересующий момент времени, проводится интерполяция целеуказаний полиномом по 10 точкам и получение координат в нужный момент времени. Всего доступно около 40

эталонных спутников. Поставщики целеуказаний заявляют о метровой точности своих данных. Сверим данные по одному спутнику с разных лабораторий. График разности целеуказаний представлен на рис. 3. Для получения достоверной оценки точности измерений использовался только начальный участок.

## 2. Результаты обработки

Для проверки оптических измерений с телескопа, точные координаты спутника на момент оптических измерений вычисляются с помощью интерполяции. Угловые координаты переводятся в одну систему координат с учетом нутации, прецессии, суточного вращения Земли. Полученные координаты переводятся в угловые координаты RA, DEC, с которыми и необходимо сравнивать полученные с телескопа оптические измерения. В табл. 1 представлены полученные результаты по спутнику Jason-1 в угловых секундах.

Из табл. 1 видно значительное отклонение оптических измерений от действитель-



Рис. 4. Трек спутника на кадре

ных координат спутника. Так как наблюдатель находится в подвижной системе и оптический путь от спутника до телескопа проходит через атмосферу необходимо сделать поправки на соответствующие искажения.

### 3. Компенсация искажений

Для больших расстояний становится существенной задержка распространения света, из-за этого телескоп наблюдает объект с задержкой в несколько миллисекунд [1]. Для устранения этого искажения необходимо сделать поправку к привязке по времени. Поправка зависит от дальности. На рис. 4 представлен трек от спутника.

При астрономических наблюдениях из-за движения Земли происходит изменение направления распространения света (рис. 5). Различают годичную, суточную и вековую абберации. Годичная абберация связана с движением Земли вокруг Солнца. При наблюдении с поверхности Земли положение звезд изменяется от  $-20''$  до  $+20''$ .

На полученных изображениях с оптических телескопов положение звезд на кадрах соответствует их виртуальному положению из-за абберации, а так как спутник вращается вокруг Земли и летит вместе с ней вокруг Солнца, его видимое положение не искажается из-за аббераций. Так как координаты спутника определяются из привязки соседних звезд на кадре к звездному каталогу, то необходимо учесть, что на кадре спутник имеет действительное положение, а звезды виртуальное, и пересчитать полученные измерения в виртуальные координаты [2].

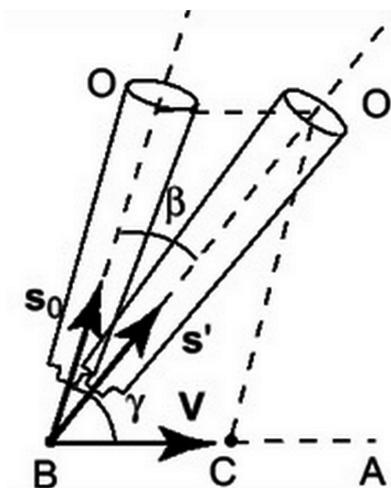


Рис. 5. Абберация света

При прохождении через атмосферу направление света изменяется из-за преломления. При горизонте такое отклонение достигает 35 угловых минут. Из-за конечной дальности до спутника его положение на получаемых кадрах смещается относительно карты звездного неба, по которой делается привязка. Этот эффект называется рефракционным параллаксом и изображен на рис. 6. В действительности спутник находится выше над горизонтом, чем звезды после учета рефракции.

В сводной табл. 2 представлены все искажения и их максимальный вклад.

После учета описанных искажений получены следующие результаты, представленные в таблице 3 и на рис. 7 и 8. После коррекции измерений отклонения от истинных значений составляют менее 1,5 угловых секунд.

В настоящий момент сеть телескопов постоянно получает оптические измерения и дает хорошую точность измерений с учетом использования недорогой техники. Полученные измерения используются для уточнения орбит и поддержания каталога и вносят существенный вклад.

В табл. 4 представлена точность измерений по эталонному спутнику Jason-2 и вклад каждого искажения (рис. 9, 10).

### Выводы

В работе проведен анализ точности оптических наблюдений Кисловодского наблюдательного пункта. Были рассмотрены основные факторы, влияющие на точность измерений: рефракция в атмосфере, годичная абер-

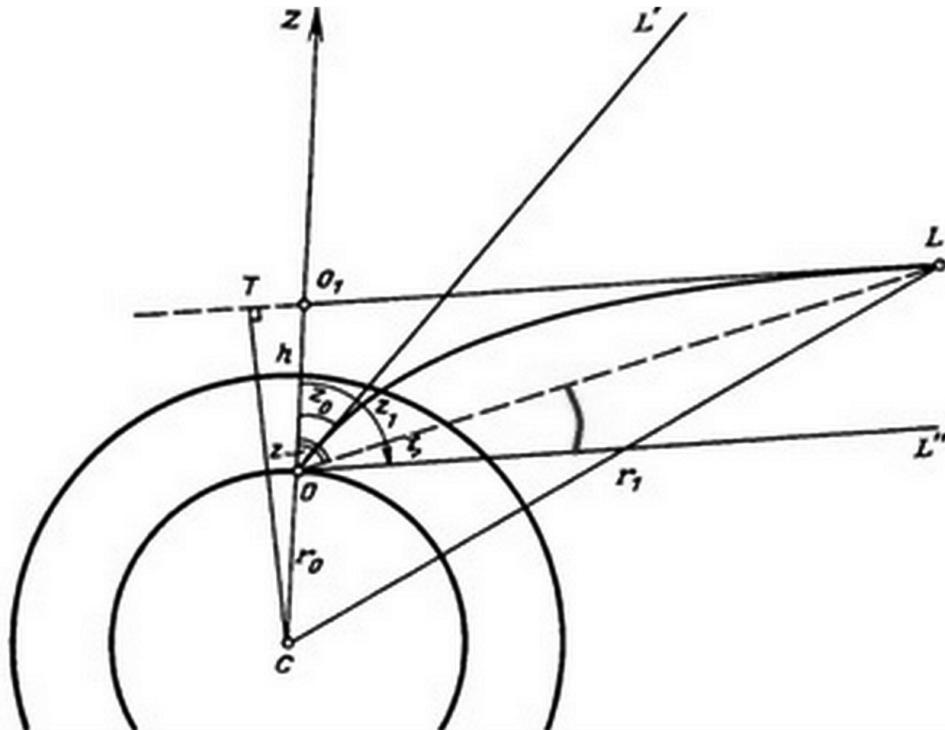


Рис. 6. Рефракционный параллакс для объектов с конечной дальностью

Таблица 2. Список искажений, их вклад и учет при проверке точности

Искажение	Влияние на измерения	Поправка на искажение
Суточная абберация	Искажения на экваторе до $0,32''$	-
Годичная абберация	До $20''$	+
Рефракция	Изменение зенитного угла	+
Конечная скорость света	Запаздывание события	+
Параллакс	Малые искажения $< 1''$	-
Движение звезд	Учет в каталоге звезд	+

Таблица 3. Расхождение оптических измерений после коррекции изображений

dRa	dDec	Продольная ошибка	Поперечная ошибка	Зенитный угол
0,55	-0,01	-0,45	0,31	41,31
5,69	2,84	-6,33	0,69	41,73
1,63	-0,44	-1,27	1,12	45,13
-1,21	-0,76	1,42	0,16	45,68
0,99	-0,29	-0,84	0,60	49,68
1,31	-0,29	-1,15	0,69	50,27
-1,78	-2,37	2,26	1,92	54,40
-0,66	-0,75	0,80	0,60	54,99

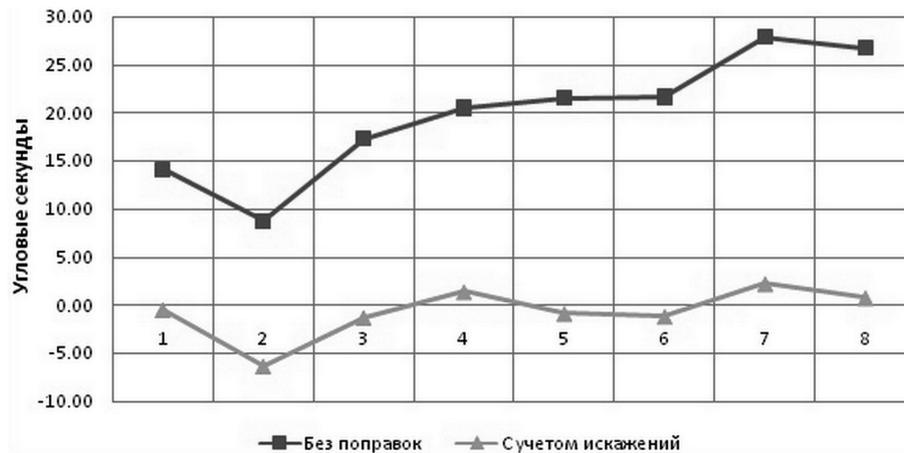


Рис. 7. Продольная ошибка после учета искажений

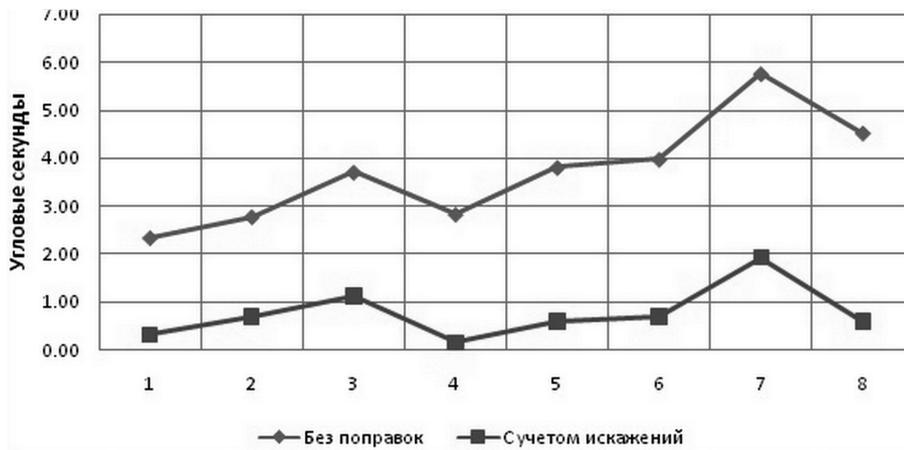


Рис. 8. Поперечная ошибка после учета искажений

Таблица 4. Оценка точности по эталонному спутнику Jason-2

	dRa	dDec	Продольная ошибка	Поперечная ошибка	Зенитный угол
	0,69	0,82	-1,06	0,14	54,56
	2,14	3,34	-3,96	0,13	53,82
	-0,15	0,10	-0,02	-0,18	53,06
	-0,07	0,12	-0,10	-0,10	48,25
	0,96	3,49	-3,62	0,06	47,38
	0,32	0,38	-0,44	0,24	46,50
	-0,14	-0,24	0,22	-0,16	40,84
	-0,32	2,20	-2,22	0,00	39,78
	0,87	-1,80	1,94	0,50	38,75
	-0,09	0,84	-0,78	0,32	32,21
	1,26	-0,99	1,50	0,56	31,05
	-0,58	1,40	-1,48	0,29	29,86
	1,04	-0,61	1,17	0,28	22,33
	1,50	-0,98	1,77	0,28	21,02
	0,25	0,24	0,03	0,35	19,69
<b>M</b>	0,51	0,55	-0,47	0,18	
<b>D</b>	0,60	2,34	3,22	0,05	

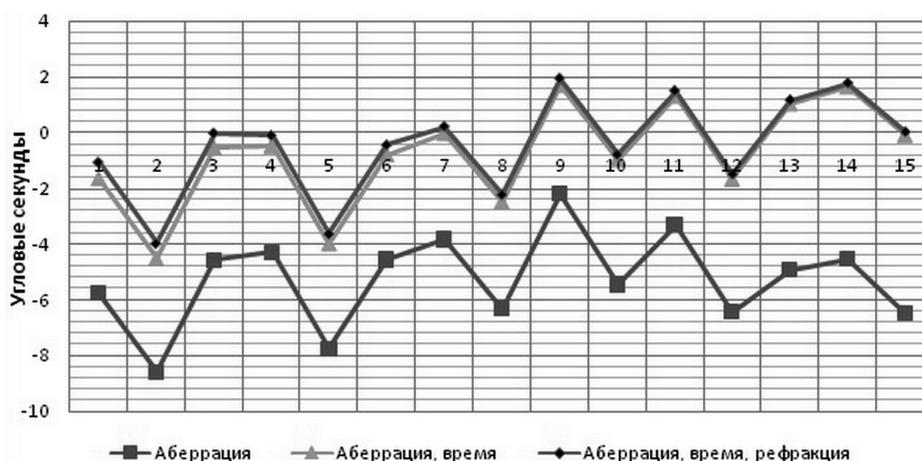


Рис. 9. Продольная ошибка в зависимости от поправок на искажения

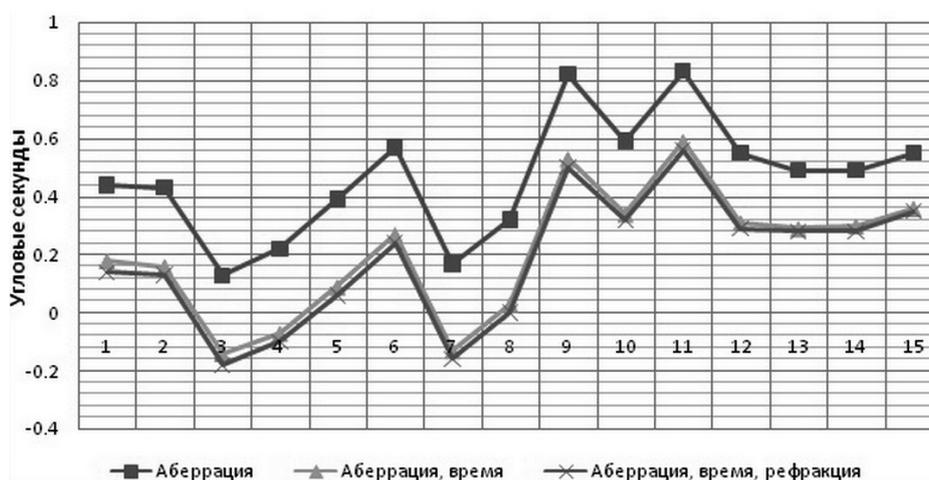


Рис. 10. Поперечная ошибка в зависимости от поправок на искажения

рация, задержка на время прохождения света от космического объекта к телескопу. Было рассмотрено влияние учета приведенных факторов на точность измерений.

Показано, что в настоящее время регулярно получаемые оптические измерения от оптико-электронного комплекса в Кисловодске обладают хорошей точностью измерений с учетом использования недорогой техники. Полученные измерения используются для уточнения орбит и вносят существенный вклад в поддержание каталога космических объектов.

Ключевые слова: оптические наблюдения спутников, точность оптических наблюдений, эталонные спутники.

### Литература

1. *Абалакин В. К., Краснорылов И. И., Плахов Ю. В.* Геодезическая астрономия и астрометрия. Справочное пособие. М.: Геодиздат, 1996. 435 с.
2. *Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А.* Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: Учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского университета, 2007. 178 с.

Статья поступила 29 октября 2013 г.

ОАО «Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», г. Москва

© Андрианов Н. Г., Толстов А. А., 2013