

УДК 520.82

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ БЛЕСКА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЕЕ ФОРМИРОВАНИЮ В ОБСЕРВАТОРИИ ТИРАСПОЛЯ

Лукьянов А. П., Гундрова Е. И., Равдин С. С., Пругло А. В., Выхристенко А. М.

A GENERALIZED MODEL OF LUMINOSITY OF SPACE OBJECTS FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF OBSERVATION PLANNING, AND EXPERIMENTS ON MODEL'S
FORMATION IN THE TIRASPOL OBSERVATORY

Lukyanov A. P. *, Gundrova E. I. *, Ravdin S. S. *, Pruglo A. V. *, Vyhristenko A. M. **

* Public Corp. "МАК Вымпел", Moscow, 125480, Russia

** Taras Shevchenko Transnistria State University, Tiraspol, Transnistria
e-mail: kikkolo@mail.ru

Abstract. The range of space objects' luminosity is wide and goes beyond the limiting magnitudes of telescopes. Present model of luminosity does not take into account failed attempts of measurements. It cases overestimation of the model parameters. In fact, as actual estimates correspond to conditional distribution law, they, in general, depend on limiting magnitude. To avoid bias of estimates, the criterion was proposed and analytical and numerical algorithms were developed. In this work the description of generalized model of luminosity of space objects and its testing are presented.

The algorithm of estimation parameters of the model was programmed and successfully simulated. The results of tests, when space objects with luminosity close to limiting magnitude are observed, and a comparison of estimates obtained by the proposed algorithm with estimates based on the existing model are proposed in the work. The comparison shows that algorithm estimates parameters more accurately due to the fact that the generalized model takes into account the presence of unobserved "tails" of the distribution law.

The results of testing algorithm on real data from Tiraspol Observatory and suggestions for other observatories engaged in monitoring near-Earth space objects to fulfill similar activities are also mentioned. Implementation of these recommendations helps to get a greater amount of information for parameters' estimation of generalized model of luminosity for a greater number of space objects.

It is expected that proposed model will improve the efficiency of observation planning of telescopes with different limiting magnitude at the stage of distribution tasks between them.

Keywords: optical observations of space objects, luminosity of space objects, observation planning, parameter estimation.

Лукьянов Александр Петрович, д-р техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы» физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий Московского физико-технического института, начальник сектора по сбору и обработке оптических наблюдений ПАО «МАК «Вымпел»»; e-mail: kikkolo@mail.ru.

Гундрова Елена Игоревна, студентка кафедры «Информационные системы» физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий Московского физико-технического института, инженер ПАО «МАК «Вымпел»»; e-mail: gundrova@phystech.edu.

Равдин Сергей Семенович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Информационные системы» физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий Московского физико-технического института, старший научный сотрудник ПАО «МАК «Вымпел»»; e-mail: wurf@yandex.ru.

Пругло Алексей Витальевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ПАО «МАК «Вымпел»»; e-mail: my@dinfo.ru.

Выхристенко Александр Михайлович, директор Центра астрономии кафедры теоретической и общей физики Приднестровского государственного Университета им. Т.Г. Шевченко; e-mail: astrovam1@rambler.ru.

Работа была частично поддержана программой 5-100 Российской Федерации в Московском физико-техническом институте.

Введение

Задача создания обобщенной модели блеска возникла после длительных экспериментов, проводимых на телескопе в обсерватории Тирасполя — одном из первых телескопов Вымпела [1]. Он начал проводить регулярные наблюдения в 2012 г. Эксперименты на этом телескопе позволили решить целый ряд задач: задачу точной привязки координат космических объектов к звездному каталогу, имеющей особенности для широкопольной оптики; задачу адаптивной коррекции неточно выставленных осей монтировки; задачу «подхвата» новых и допояска потерянных КО, а также задачу анализа причин неудачных попыток наблюдения космических объектов [2]. После устранения «геометрических» и атмосферных причин необнаружения, неудач наблюдения стало меньше, тем не менее, они остались. В настоящей статье рассмотрена одна из оставшихся причин необнаружения — недостаточный блеск космического объекта, вызванный не поглощением излучения в атмосфере, а особенностями ракурсной зависимости блеска сложных объектов. Ее устранение позволит повысить эффективность оптических наблюдений [3].

Иметь адекватную модель, предсказывающую ожидаемый диапазон изменения блеска, важно при планировании наблюдений для конкретного телескопа, так как позволяет оценить физическую возможность наблюдения того или иного космического объекта. При централизованном планировании наблюдений в сети, состоящей из телескопов с разной проникающей способностью, также важно иметь достоверное представление о блеске космических объектов, чтобы не перегружать телескопы с большим прониканием наблюдением ярких объектов, и, наоборот, не заставлять «слабые» телескопы наблюдать заведомо тусклые объекты.

Используемая в настоящий момент модель блеска характеризуется двумя параметрами: средним значением и среднеквадратическим отклонением (СКО) относительно него. Блеск измеряется в звездных величинах, то есть в логарифмическом масштабе относительно потока принимаемого излучения. Параметры модели оцениваются по результатам только успешных наблюдений объектов. Вероятность неудачных наблюдений при этом никак не оценивается. Это может существен-

но повлиять на конечный результат, (как будет показано в настоящей работе), так как оцениваемые при таком подходе параметры являются условными оценками параметров закона распределения блеска (предполагаемого гауссовым), зависящими в общем случае от того, какова проникающая способность телескопов, которые проводят наблюдения.

Предлагаемый в настоящей работе способ позволит получать безусловные оценки параметров закона распределения блеска, не зависящие от того, какова проникающая способность используемого (используемых) телескопов. Разумеется, в рамках предположения о гауссовости этого закона. Для его реализации необходимо иметь возможность получать необходимые данные для оценки вероятности ненаблюдаемости космического объекта для каждого конкретного телескопа, вызванной недостаточной проникающей способностью.

1. Предлагаемое обобщение модели блеска

Предположим, что с помощью одного телескопа в геометрически близких условиях наблюдения получена серия измерений блеска одного и того же космического объекта. Из-за случайного разброса величин блеска и ограниченной проникающей способности телескопа не все наблюдения могут оказаться успешными. В предположении гауссовости закона распределения блеска можно пытаться оценить его параметры по части успешных наблюдений.

Для получения оценки параметров распределения естественно применить метод наименьших квадратов (МНК) в диапазоне доступных величин блеска [4, 5]

$$\min_{m, \sigma} \int_{-\infty}^x (P(y, m, \sigma) - P^*(y))^2 dy,$$

где $P^*(y)$ обозначено выборочное интегральное распределение измеренных величин блеска, а $P(y, m, \sigma)$ — оцениваемое (искомое) распределение с параметрами m, σ — математическим ожиданием и СКО. Через x здесь обозначена проникающая способность телескопа.

Начальное приближение для метода наименьших квадратов можно найти из алгебраических уравнений, получающихся приравни-

ванием выборочных моментов распределения к оцениваемым.

Вероятность успешного наблюдения (нулевой момент) связана с проникающей способностью телескопа x , математическим ожиданием блеска m и его СКО σ следующим выражением:

$$P_0 = \int_{-\infty}^x P(y) dy = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(y-m)^2}{\sigma^2}} dy = F\left(\frac{x-m}{\sigma}\right),$$

где $F(x)$ — функция интегрального нормального закона распределения. Используя обратную функцию $F^{-1}(P)$, можно связать математическое ожидание с СКО следующим соотношением:

$$\frac{x-m}{\sigma} = F^{-1}(P_0) = c.$$

Таким образом, зная из наблюдений оценку вероятности наблюдения P_0 , получаем одно уравнение связи. Поскольку неизвестных параметров в задаче три (m , σ и проникание телескопа x), то нужно записать два дополнительных уравнения для их определения. Для этого вычислим первые два момента условного закона распределения.

Вычислим первый момент закона распределения m^* — условное математическое ожидание через параметры закона распределения

$$\begin{aligned} m^* &= \int_{-\infty}^x y \frac{P(y)}{P_0} dy = \\ &= \frac{1}{P_0} \int_{-\infty}^x \frac{y}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(y-m)^2}{\sigma^2}} dy = \\ &= m + \frac{1}{P_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^c \frac{x-m}{c} u e^{-\frac{u^2}{2}} du. \end{aligned}$$

Сделаем замену переменных $t = \frac{u^2}{2}$. Тогда после взятия интеграла получим, что

$$m^* = m \left(1 + \frac{1}{P_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi c}} e^{-\frac{c^2}{2}} \right) - \frac{1}{P_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{x}{c} e^{-\frac{c^2}{2}}.$$

Отсюда можно выразить «истинное» математическое ожидание (безусловное) через условное

$$m = \frac{P_0 m^* c + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} x e^{-\frac{c^2}{2}}}{P_0 c + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{c^2}{2}}}.$$

Аналогично вычислим второй центральный момент условного закона распределения σ^{2*} . Его связь с начальным моментом записывается как

$$\begin{aligned} \sigma^{2*} &= \int_{-\infty}^x (y - m^*)^2 \frac{P(y)}{P_0} dy = \\ &= \int_{-\infty}^x \left[y^2 \frac{P(y)}{P_0} - 2ym^* + m^{*2} \frac{P(y)}{P_0} \right] dy = \\ &= \int_{-\infty}^x y^2 \frac{P(y)}{P_0} dy - (m^*)^2. \end{aligned}$$

После взятия интеграла получаем соотношение

$$\begin{aligned} P_0 \sigma^{2*} &= m^2 P_0 + \sigma^2 \left(P_0 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} c e^{-\frac{c^2}{2}} \right) - \\ &- 2m\sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{c^2}{2}} - (m^*)^2 P_0. \end{aligned}$$

Оно представляет квадратное уравнение для нахождения «истинного» (безусловного) значения СКО σ из условного СКО σ^* .

2. Результаты моделирования

Для проверки предложенного алгоритма оценки параметров обобщенной модели блеска и сравнения результатов его работы с используемой в настоящее время моделью было проведено моделирование методом Монте-Карло [6].

При моделировании предполагалось:

- число наблюдений (успешных и безуспешных) равное 100,
- число независимых испытаний для набора статистики равное 300,
- проникающая сила телескопа равное 12^m (тут важно отметить то, что алгоритм этой величиной не пользуется),
- СКО блеска космического объекта равное 2^m .

Было промоделировано наблюдение космических объектов с разным математическим ожиданием блеска: от 6^m до 14^m с шагом

2^m , то есть были рассмотрены как яркие объекты, всегда доступные наблюдению данного телескопа, так и тусклые объекты, которые телескоп может видеть лишь изредка.

На рис. 1, 2 изображены примеры интегральных законов распределения для оценок математического ожидания и СКО, полученных разными методами. Сплошной линией — полученные по моментам распределения, точками — методом наименьших квадратов. Для сравнения, пунктирной линией показаны законы распределения оценок, получаемых только по успешно наблюдаемым объектам (условные мат. ожидание и СКО) в рамках существующей модели блеска.

Из рис. 1, 2 видно, что для яркого объекта, наблюдаемого практически всегда, интегральные законы практически совпадают, а для тусклого объекта возникают большие различия условных и безусловных оценок параметров модели блеска. Величины отклонений, получаемых разными методами оценок, от их истинных значений представлены в табл. 1.

Очевидно, что обобщенная модель гораздо точнее определяет истинные параметры модели блеска, чем существующая.

Из рис. 1, 2 также видно, что случайный разброс оценок увеличивается по мере уменьшения блеска объекта и соответствующего уменьшения числа успешных наблюдений.

Методика оценки параметров обобщенной модели блеска на практике

Для получения на практике адекватной оценки вероятности наблюдения (точнее ненаблюдения) требуется проведение тщательного анализа всех случаев, когда в итоге запланированных наблюдений объект не был обнаружен. При этом важно различать случаи неудачных попыток наблюдения, связанных с недостаточным блеском космического объекта, от неудач по другим причинам.

С конца 2015 г. на телескопе Вымпела, расположенном в обсерватории Тирасполя, проводится отработка методики фильтрации, разработанной с целью выделения наблюдений, в которых обнаружение было вызвано недостаточным блеском объекта. После первичной обработки полученные данные всех сеансов наблюдения обрабатываются совместно. В результирующем файле для каждого космического объекта сохраняется вся необ-

ходимая информация для оценки параметров обобщенной модели блеска.

Разумеется, наблюдения с большими ошибками нацеливания или попытки наблюдения неосвещенного объекта не должны учитываться при построении обобщенной модели блеска.

Из-за того, что космических объектов много, а методика применялась в основном на одном телескопе, накопление информации по каждому из них потребовало значительного времени. Тем не менее, первые результаты оценки блеска по экспериментальным измерениям были получены. В качестве примера в табл. 2 приведены оценки для нескольких космических объектов.

Из данных табл. 2 видно, что для объекта 95476 с большой вероятностью успешных наблюдений P_0 существующая модель даёт довольно точную оценку блеска. Для остальных объектов, имеющих низкую вероятность наблюдения P_0 , параметры существующей и обобщенной модели существенно различаются. Среднее значение отличается примерно на 2 звездные величины, а СКО увеличивается более чем вдвое.

В теоретическом плане не рассмотрены вопросы, касающиеся отличий в проницании телескопов, вызываемых:

- 1) различиями в прозрачности атмосферы и уровне фона во времени и по углам места;
- 2) различиями времени экспозиции;
- 3) различиями конструктивных проницающих сил разных телескопов.

В практическом плане необходимо расширить состав данных, формируемых на наблюдательных пунктах и обеспечить их передачу для централизованной обработки и обобщения модели блеска:

1) Дополнительно предусмотреть количественный контроль качества фокусировки телескопа, который можно использовать для коррекции проницания телескопа.

2) Разработать и внедрить в рамках сети привлекаемых средств формат передачи информации, необходимой для формирования обобщенных моделей блеска по наблюдаемым объектам. То есть наряду с файлом измерений должен отсылаться файл наблюдений с угловыми координатами нацеливания, исправленными после привязки к звездам. Для анализа астроклимата полезно формировать

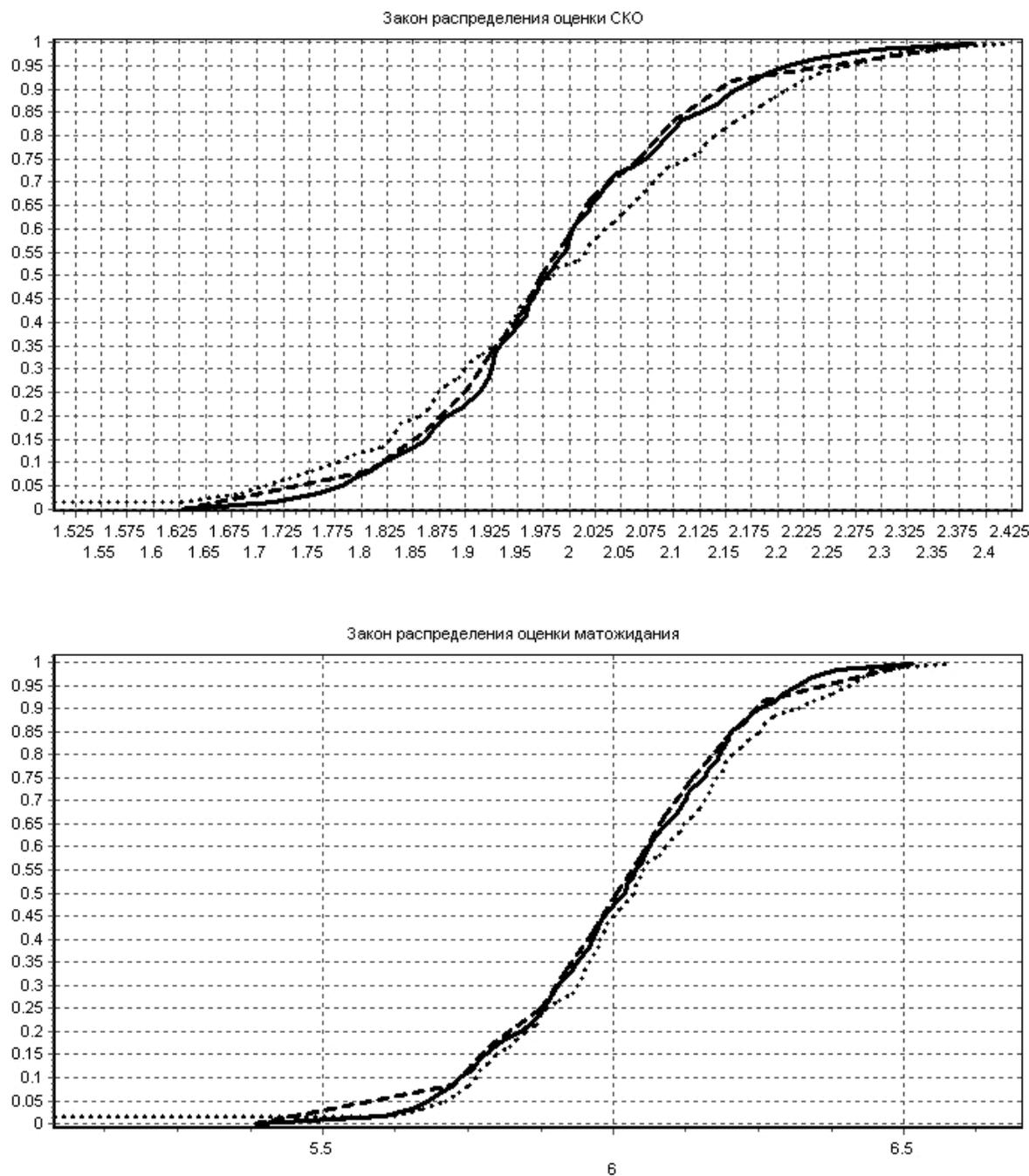


Рис. 1. Интегральные законы распределения для оценки СКО (сверху) и математического ожидания (снизу) при истинных значениях параметров 2 и 6 соответственно. Обобщение модели блеска: реализация — 300, наблюдений — 100, проникание — 12, истинное МО — 6,0, истинное СКО — 2,0

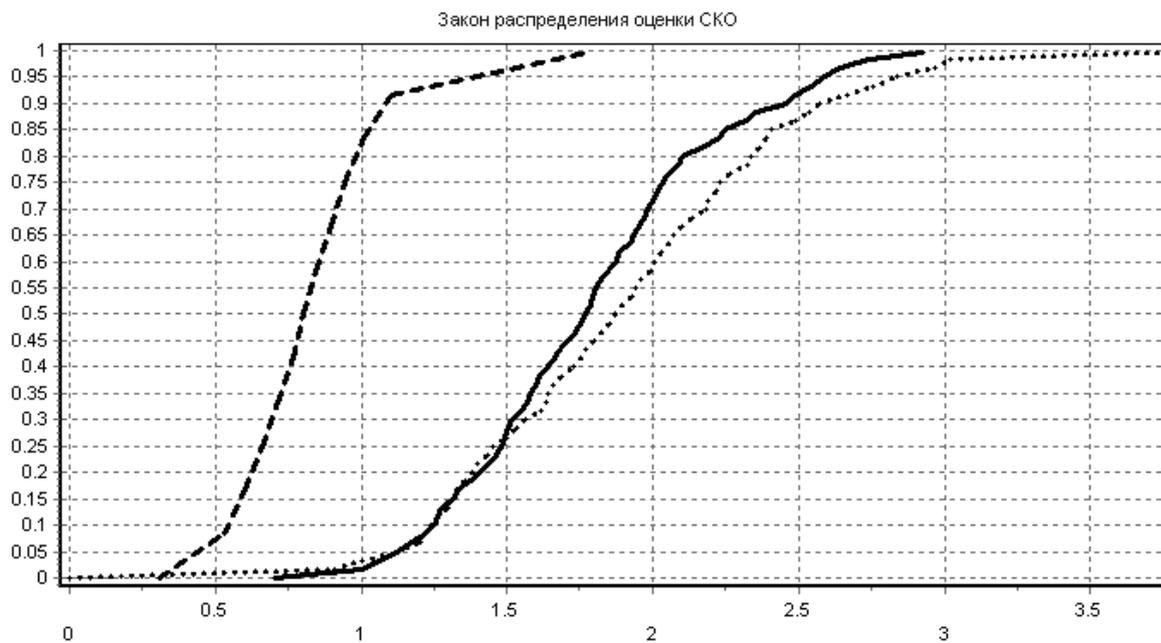


Рис. 2. Интегральный закон распределения для оценки СКО (сверху) и математического ожидания (снизу) при истинных значениях параметров 2 и 14 соответственно. Обобщение модели блеска: реализация — 300, наблюдений — 100, проницание — 12, истинное МО — 14,0, истинное СКО — 2,0

Таблица 1

Истинное мат. ожидание	Медиана ошибки оценки мат. ожидания по моделям			Медиана ошибки оценки СКО по моделям		
	моментов	МНК	существ.	моментов	МНК	существ.
6	0	0	+0,03	-0,03	0	-0,05
8	0	+0,03	-0,15	-0,03	0	-0,15
10	+0,03	+0,03	-0,6	-0,05	0	-0,4
12	-0,03	+0,03	-1,6	-0,05	0	-0,8
14	-0,4	-0,15	-3,1	-0,25	-0,15	-1,2

Таблица 2

Номер КО	N	P_0	Существующая модель блеска		Обобщенная модель блеска			
					Первое приближение		Оценка МНК	
			Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
92013	171	0,39	10,75	0,65	13,40	2,77	12,41	1,84
95476	100	0,88	10,64	0,69	11,02	3,18	10,72	0,69
92037	508	0,25	9,12	0,72	11,57	1,94	11,18	1,64

Пояснение: N — количество измерений, P_0 — вероятность успешного наблюдения (нулевой момент)

файл с запланированными углами нацеливания и оценкой прозрачности.

Заключение

В работе предложена обобщенная модель блеска космических объектов, проведено моделирование ее применения, показавшее ожидаемую эффективность от ее использования. Также разработана и опробована методика оценки параметров обобщенной модели блеска на практике.

Литература

1. Лукьянов А.П., Лагуткин В.Н., Мальцев А.В., Колесса А.Е., Ким А.К., Равдин С.С., Пругло А.В., Молотов И.Е., Выхристенко А.М., Андрианов Н.Г. Регулярные оптические наблюдения низкоорбитальных спутников в Тирасполе, Кисловодске и Москве в 2012-2013 гг. Первые результаты и перспективы // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. Т. 3, № 4. С. 101–105.
2. Колесса А.Е., Пругло А.В., Равдин С.С., Ким А.К., Лукьянов А.П. Комплекс алгоритмов автоматического обнаружения космических объектов по оптическим изображениям, оценки угловых координат и параметров орбит // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. Т. 3, №4. С. 85–90.

3. Хуторовский З.Н., Шпитальник М.Ц., Колесса А.Е., Лукьянов А.П. Критерий и анализ эффективности оптических наблюдений космических объектов телескопами ПАО “МАК “Вымпел” // Сборник тр. междунар. конф. «Околоземная астрономия-2015». 2015. С. 250–255.
4. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 349 с.
6. Fishman G.S. Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications. Springer, 1996. 728 p.

References

1. Luk'yanov A.P., Lagutkin V.N., Mal'tsev A.V., Kolessa A.E., Kim A.K., Ravdin S.S., Pruglo A.V., Molotov I.E., Vykhristenko A.M., Andrianov N.G. Regularnyye opticheskie nablyudeniya nizkoorbital'nykh sputnikov v Tiraspol, Kislovodsk i Moskve v 2012-2013 gg. Pervye rezultaty i perspektivy [Regular optical observations of low orbiting satellites in Tiraspol, Kislovodsk and Moscow in 2012-2013. First results and prospects]. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, vol. 3, no. 4, pp. 101–105. (In Russian)

2. Kolessa A.E., Pruglo A.V., Ravdin S.S., Kim A.K., Luk'yanov A.P. Kompleks algoritmov avtomaticheskogo obnaruzheniya kosmicheskikh ob"ektov po opticheskim izobrazheniyam, otsenki uglovykh koordinat i parametrov orbit [A complex of algorithms for automatic detection of space objects by optical images, estimates of angular coordinates and orbit parameters]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, vol. 3, no. 4, pp. 85–90. (In Russian)
3. Khutorovskiy Z.N., Shpital'nik M.Ts., Kolessa A.E., Luk'yanov A.P. Kriteriy i analiz effektivnosti opticheskikh nablyudeniy kosmicheskikh ob"ektov teleskopami PAO "MAK 'Vympel'" [Criterion and analysis of the efficiency of optical observations of space objects by telescopes of PAO "MAK 'Vympel'"]. In: *Sbornik tr. mezhdunar. konf. "Okolozemnaya astronomiya-2015"* [Proc. Intern. Conf. "Near-Earth Astronomy 2015"], 2015, pp. 250–255. (In Russian)
4. Gill F., Myurrey U., Rayt M. *Prakticheskaya optimizatsiya* [Practical optimization]. Moscow, Mir Pub., 1985, 509 p. (In Russian)
5. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy* [The method of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of processing observations]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. literaturi Pub., 1962, 349 p. (In Russian)
6. Fishman G.S. *Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications*. Springer, 1996, 728 p.

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Лукьянов А. П., Гундрова Е. И., Равдин С. С., Пругло А. В., Выхристенко А. М., 2017

Статья поступила 2 ноября 2017 г.