

Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве

© А.О. Жуков^{1,3}, А.И. Захаров¹, М.Е. Прохоров¹,
Н.И. Шахов², В.С. Гедзюн³, А.И. Гладышев⁴

¹ Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ

² 4-й Центральный научно-исследовательский институт Минобороны России

³ Институт астрономии РАН

⁴ Научно-исследовательская лаборатория Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого

Проведен анализ фоновой звездной обстановки при внеатмосферных наблюдениях космических объектов в спектральных диапазонах 0,17...0,3, 0,4...0,7 и 3...5 мкм, а также в спектральной полосе V Джонсона. Смоделировано пространственное распределение яркости фона неба, наблюдаемого из космоса в каждом диапазоне, и пространственное распределение звезд в зависимости от расстояния до плоскости Галактики. Определена средняя яркость фона неба в каждом из рассматриваемых спектральных каналов. Данные известных каталогов адаптированы к полосе чувствительности кремниевых фотоприемников — как по координатным измерениям (фотоцентр двойной звезды, состоящей из звезд с различными спектрами, смещается в зависимости от спектрального диапазона фотоприемника), так и по некоординатным измерениям (получены более точные потоки излучения).

Ключевые слова: астрономические спектральные полосы, каталоги звезд, межзвездное покраснение, околоземное космическое пространство, спектральная полоса прибора, фон неба.

Введение. При разработке широкоугольных современных приборов ориентации и навигации, основанных на применении оптико-электронных фотоприемников, необходимо проводить учет уровня фона неба в широком спектральном диапазоне (0,2...5 мкм). Также для оценки помех следует задать модель яркости космических объектов различных размеров на единице площади неба. Основные источники фонового излучения неба рассматривались в различных работах, например в [1].

В ультрафиолетовом диапазоне сегодня доступны данные, полученные в космических экспериментах ОАО-2 [2], TD-1 [3], IUE [4] и Galex [5]. В частности, существуют каталоги спектральной плотности облученности для многих ярких звезд различных спектральных классов (в том числе с разными температурами). Также доступны измерения фона неба, сделанные на немногочисленных площадках.

Астрономические каталоги в видимом диапазоне (спектральный диапазон 0,4...0,7 мкм) представлены каталогами спектральной плотно-

сти облученности для многих ярких звезд неба. Однако полных каталогов от ярчайших до звезд 23-й звездной величины и фотометрических обзоров по всему небу сегодня не существует. Наиболее полным и точным для ярких звезд можно считать обзор неба Tycho-2 [6], сделанный в двух полосах: B_T (голубая область спектра) и V_T (визуальная область спектра). Он насчитывает около 2,5 млн звезд примерно до 12-й звездной величины. К сожалению, обе полосы немного отличаются от полос B и V фотометрической системы Джонсона.

Специальные измерения фона неба из космоса в этом диапазоне не проводились, но обоснованно считается, что он определяется излучением слабых неразрешенных звезд и галактик.

В инфракрасном диапазоне для ярких звезд в космическом эксперименте ISO был создан каталог спектральной плотности облученности для многих ярких звезд различных спектральных классов [7]. В спектральном диапазоне 1...2,5 мкм в области окон прозрачности земной атмосферы был создан обзор неба от самых ярких звезд до звезд 15...17-й звездной величины — 2MASS [8]. Он содержит примерно 0,5 млрд объектов в трех полосах: J (1,24 мкм), H (1,66 мкм) и K (2,16 мкм). Полнота каталога ограничивается примерно 15-й звездной величиной в полосе K и 17-й звездной величиной — в полосе J . В инфракрасном диапазоне существуют оценки фона неба в отдельных участках спектра.

Учитывая, что в ультрафиолетовом и видимом диапазоне не нашлось подходящего обзора для оценки среднего числа звезд на небесной сфере до заданной величины, было решено использовать для звездных подсчетов 2MASS — каталог звезд в ближней инфракрасной области после преобразования его величин в видимую область [1].

Спектральную плотность облученности от звезд-стандартов брали для УФ-диапазона — из наблюдений IUE; видимого диапазона — из каталогов распределения энергии в спектрах звезд; ИК-диапазона — из каталога эксперимента ISO [7].

Данные по яркости фона неба в различных спектральных диапазонах взяты из работ [2,9–18].

Средняя плотность звезд на квадратном градусе. Если бы межзвездное пространство не содержало поглощающей материи, то оценка числа звезд не представляла бы больших трудностей, поскольку для подавляющего числа звезд показатели цвета зависят друг от друга [3]. Зависимости показателей цвета $m_\lambda - J$ от показателя цвета $J - K$ [8] можно получить по распределениям энергии в спектрах стандартных звезд различных спектральных классов. Вычислив для конкретной звезды ее показатели цвета $m_\lambda - J$ ($J - K$) и добавив к нему величину J этой звезды,

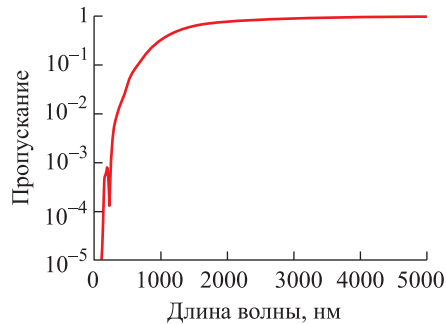


Рис. 1. Зависимость пропускания межзвездной среды от длины волны для толщи межзвездного газа на расстоянии 120 пс [23]

можно получить искомую величину m_λ .

Однако в межзвездном пространстве находится поглощающая материя, более коротковолновые величины ослабляются (увеличиваются) сильнее, нежели длинноволновые (рис. 1).

Возьмем за начальное приближение расстояние до звезды такое расстояние, на котором звезда спектрального класса, соответствующего ее колор-индексу, имеет нужную звездную величину.

Вычислим по формуле Паренаго [19] поглощение для такой звезды (оно зависит только от спектральной полосы, расстояния и высоты над плоскостью Галактики), исправим ее расстояние и колор-индексы и будем повторять эту процедуру до тех пор, пока расстояние не перестанет изменяться. Далее вычислим необходимые звездные величины такой звезды на полученном расстоянии и с полученным поглощением.

Таким образом, имеем функции плотности звезд в зависимости от галактической широты, усреднив которые по всему небу, найдем средние плотности распределения звезд.

Используя эту процедуру, подобную описанной в работе [20], получили плотности распределения звезд в зависимости от галактической широты и звездной величины для всех спектральных интервалов. Некоторые результаты приведены на рис. 2–4.

На всех рис. 2–4 видно, что с увеличением звездной величины (т. е. при увеличении расстояния) в видимой и в УФ-областях спектра разница в плотности звезд на Млечном Пути и в полюсах Галактики уменьшается. Это следствие двух эффектов: тяготения молодых голубых звезд к галактической плоскости и значительного поглощения излучения пылевой материей в плоскости Галактики для далеких звезд. В ИК-области этот эффект малозаметен. В тех галактических широтах, где плотность звезд невелика (до 10 звезд на квадратный градус), на графиках заметны шумы функции плотности.

Осреднив по галактической широте плотности звезд, получим средние по всему небу числа звезд до указанной величины. Для различных спектральных интервалов они приведены на рис. 5.

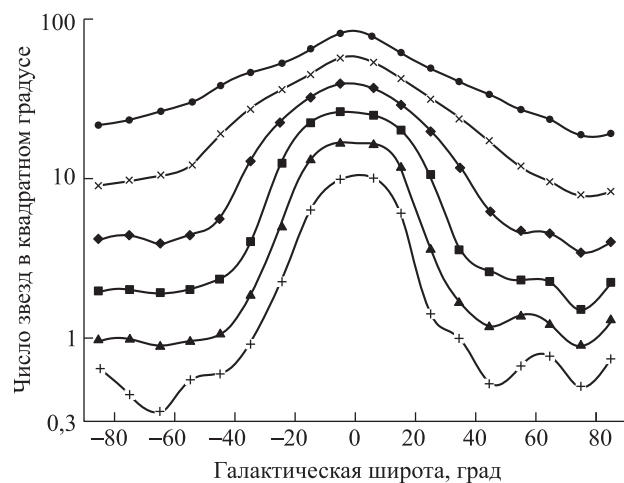


Рис. 2. Плотность звезд ярче указанной величины на квадратном градусе в спектральной полосе 0,17...0,20 мкм:
 —●— 16^m; —x— 15^m; —◆— 14^m; —■— 13^m; —▲— 12^m; —+— 11^m

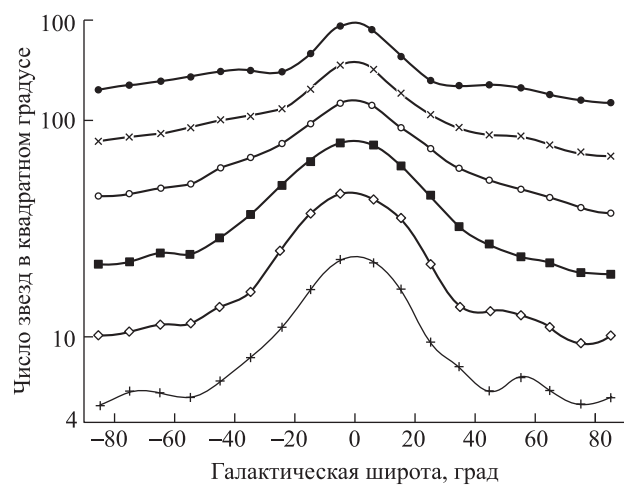


Рис. 3. Плотность звезд ярче указанной величины на квадратном градусе в спектральной полосе 0,4...0,7 мкм:
 —●— 15^m; —x— 14^m; —○— 13^m; —■— 12^m; —◇— 11^m; —+— 10^m

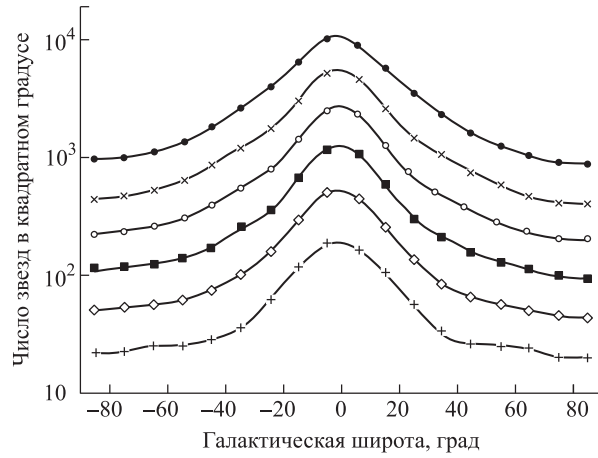


Рис. 4. Плотность звезд ярче указанной величины на квадратном градусе в спектральной полосе 3...5 мкм:
—●— 15^m; —×— 14^m; —○— 13^m; —■— 12^m; —◇— 11^m; —+— 10^m

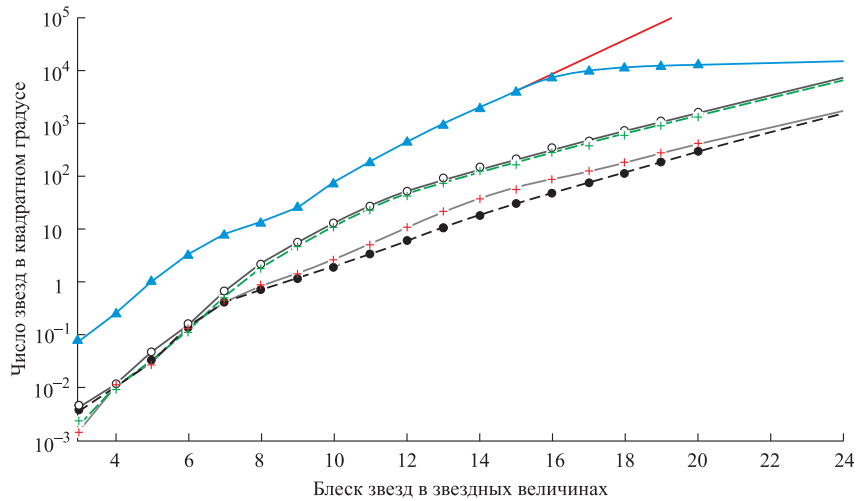


Рис. 5. Среднее по всему небу число звезд до различных звездных величин на квадратном градусе:
—▲— 3...5 мкм; —+— 0,4...0,7 мкм; —○— V ; —+— 0,2...0,3 мкм;
—●— 0,17...0,2 мкм

Здесь пунктиром показано возможное поведение функции плотности звезд при учете неполноты в величине K исходного каталога 2MASS для звезд слабее 15-й звездной величины. Отметим также, что из-за совпадения центральной длины волны плотность звезд практиче-

ски одинакова для полосы 0,4...0,7 мкм и полосы V Джонсона. Уменьшение плотности звезд в УФ-диапазоне для объектов слабее 7-й звездной величины связано с поглощением далеких звезд пылью в плоскости Галактики.

Оценки яркости фона неба. Фон в УФ-диапазоне, по данным работы [21], представляет собой клочковатые светящиеся структуры (рис. 6).

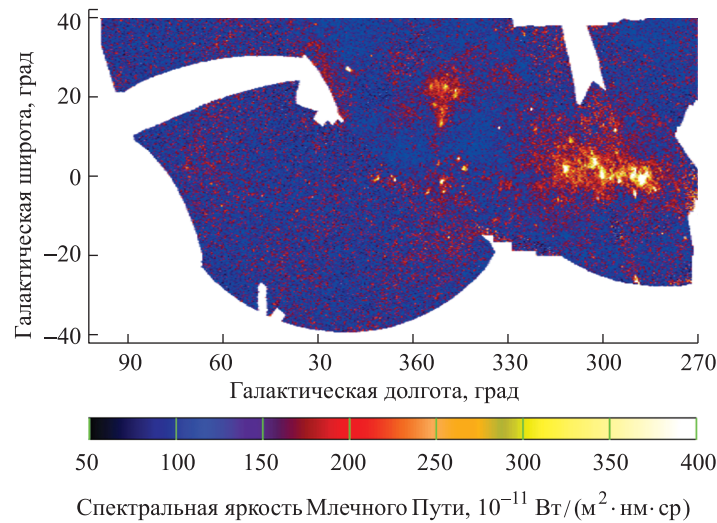


Рис. 6. Карта фона неба в длине волны 217 нм в галактических координатах. Легенда дана в единицах 10^{-11} Вт/(м²·нм·ср)

В спектральном диапазоне 0,20...0,30 мкм значения яркости фона неба зависят от галактической широты и долготы и изменяются в интервале $5...20 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·ср). Средние значения яркости фона в зависимости от галактической широты приведены ниже.

Галактическая широта, град.....	-40	-30	-20	-10	-5	0	5	10	20	30	40
Яркость фона неба, 10^{-13} Вт/(см ² ·ср).....	36	43	50	64	96	253	160	92	53	41	34

Данные распределения яркости фона неба в полосе 0,17...0,20 мкм по всему небу пока найти не удалось. Фон неба в видимом диапазоне, также весьма клочковатый, показан на рис. 7 по работе [11]. Средние яркости фона в видимом диапазоне в зависимости от галактической широты даны в таблице.

Средняя яркость фона неба в полосе V Джонсона и в полосе 0,4...0,7 мкм в зависимости от галактической широты в единицах 10^{-11} Вт/(см² · ср)

Диапазон	Галактическая широта, град												
	-20	-15	-10	-9	-8	-6	-5	0	5	10	15	25	40
Полоса V	0,5	1,6	3,2	4,2	5,2	6,8	7,9	6,3	4,7	3,7	2,6	1,0	0,5
Полоса 0,4...0,7 мкм	2,0	5,9	11,8	15,8	19,7	25,6	29,6	23,6	17,7	13,8	9,8	3,9	2,0

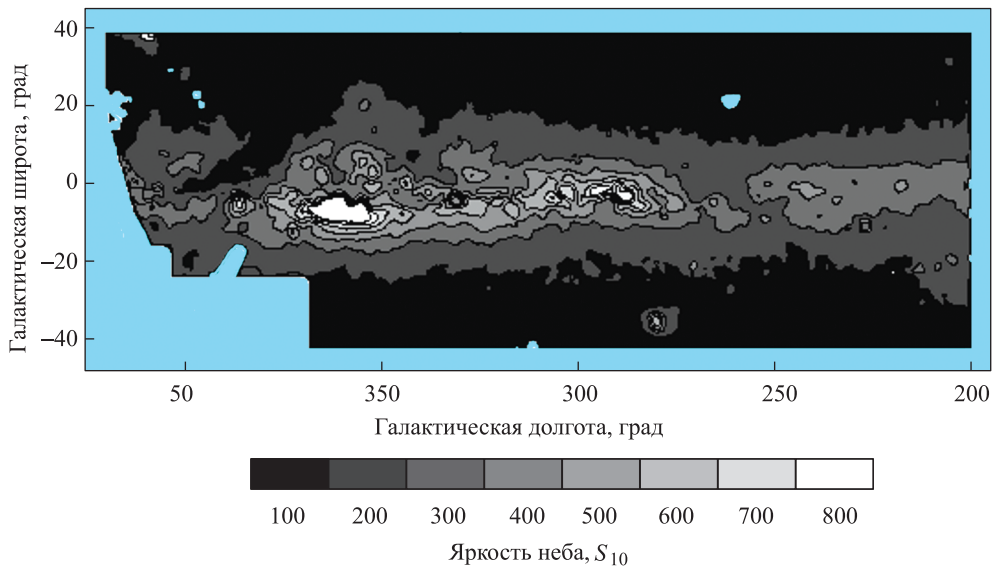


Рис. 7. Яркость фона неба в полосе V Джонсона в галактических координатах. Легенда дана в освещенностях, создаваемых указанным числом звезд 10 звездной величины (S_{10}), распределенными по 1 квадратному градусу. Для величины V Джонсона $S_{10} = 1,05 \cdot 10^{-13}$ Вт/(см² · ср); для полосы 0,4...0,7 мкм $S_{10} = 3,94 \cdot 10^{-13}$ Вт/(см² · ср)

В ИК-диапазоне поглощение излучения межзвездным веществом существенно уменьшается, поэтому градиент яркости Млечного Пути возрастает в десятки раз. При этом клочковатость фона снижается (рис. 8).

В диапазоне 3...5 мкм пиковая яркость фона в районе центра Галактики составляет $5 \cdot 10^{-9}$ Вт/(см² · ср). Зависимость средней яркости неба от галактической широты приведена ниже.

Галактическая широта, град.....	0	±2	±3	±5	±9	±15	±20	±30	±40	±60
Яркость неба, 10^{-10} Вт/(см ² · ср).....	50	42	36	26	14	8	6	5	3	2

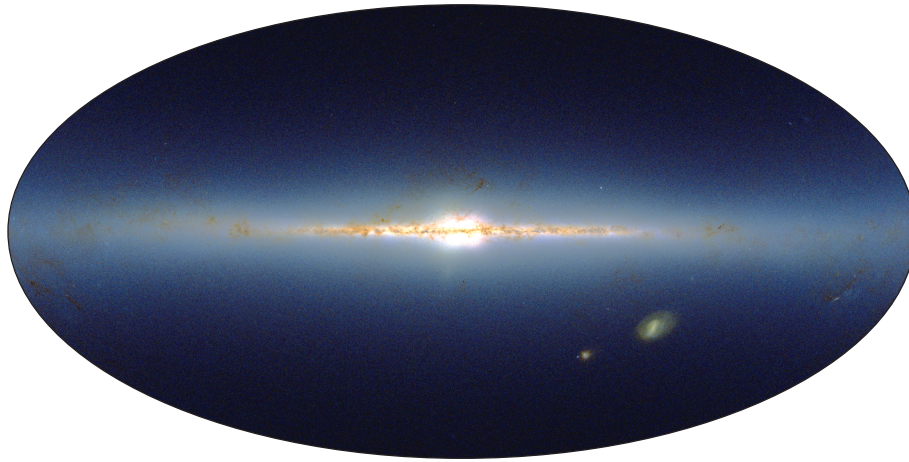


Рис. 8. Вид неба в J, H, K полосах по данным 2MASS [8] в галактических координатах в проекции Aitoff

Зодиакальный свет. Одной из важных составляющих яркости фона неба является зодиакальный свет — излучение Солнца, рассеянное на межпланетной пыли, и собственное излучение этой пыли [21].

В УФ-диапазоне, в видимой области спектра и в ближнем инфракрасном диапазоне (до 5 мкм) в излучение межпланетной пыли главный вклад вносят мелкие (менее 1 мкм) кометные частицы. Спектр рассеянного излучения зодиакального света подобен спектру Солнца с точностью до спектрального альбеда межпланетной пыли. Распределение яркости зодиакального света приведены в работе [9]. Общий вид карты яркости зодиакального света в полосе V показан на рис. 9.

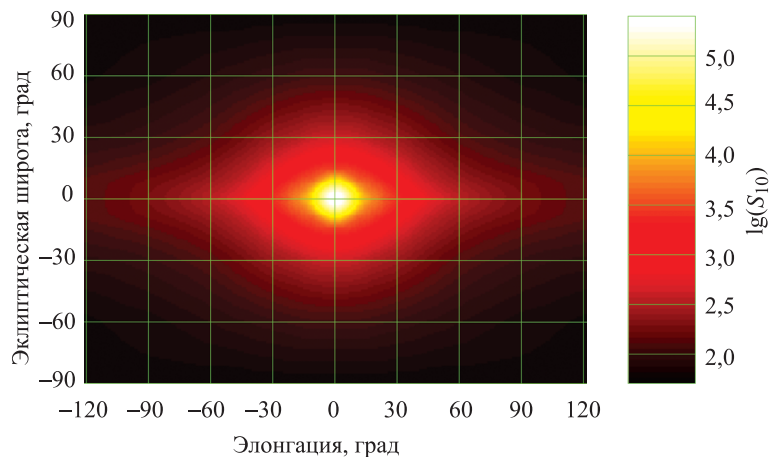


Рис. 9. Карта яркости зодиакального света в видимом диапазоне по данным эксперимента Туcho в единицах $S_{10} = 1,05 \cdot 10^{-13}$ Вт/(см²·ср) [10]

В более далеком ИК-диапазоне становится существенным вклад собственного теплового излучения пыли. Однако точно оценить этот вклад трудно, нужны измерения зодиакального света в среднем ИК-диапазоне (5...16 мкм).

Выводы.

1. Разработана методика оценки средней плотности звезд на небесной сфере, использующая доступные астрономические каталоги и модель поглощения в межзвездной среде. Проведен анализ фоновой звездной обстановки при внеатмосферных наблюдениях космических объектов в спектральных диапазонах 0,17...0,3, 0,4...0,7 и 3...5 мкм, а также в спектральной полосе V Джонсона. Смоделированы пространственное распределение яркости фона неба, наблюдаемого из космоса, в каждом диапазоне и пространственное распределение звезд в зависимости от расстояния до плоскости Галактики.

В результате получен закон распределения среднего числа звезд на квадратном градусе в зависимости от блеска (облученности) в диапазоне от ярчайших звезд до пороговых облученностей в каждом из диапазонов.

2. Определена средняя яркость фона неба в каждом из рассматриваемых спектральных каналов.

3. Созданы модель и методика расчета для учета зодиакального света в спектральном диапазоне 0,2...5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мионов А.В. *Основы астрофотометрии*. Москва: Физматлит, 2008, 193 с.
- [2] Becklin, E.E., Neugebauer G. 1.65-19.5-micron observation of the Galactic center. *Astrophys J.*, 1969, vol. 157, p. 35.
- [3] Страйжис В.Л. *Многоцветная фотометрия звезд*. Вильнюс: Мокслас, 1977. 312 с.
- [4] Wu C.-C., Ake T. B., Boggess A., Bohlin R. C., Imhoff C. L., Holm A.V., Levay Z.G., Panek R.J., Schiffer F.H. III, Turnrose B.E. The IUE Ultraviolet Spectral Atlas. *NASA IUE Newsl.*, 1983, no. 22 (Special Edition), 324 p.
- [5] Bianchi L., Herald J., Efremova B., Girardi L., Zobot A., Marigo P., Conti A., Shiao B. GALEX catalogs of UV sources. *Astrophys. Space Sci.*, 2011, vol. 335, p. 161.
- [6] Hog E., Fabriciu C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astron. Astrophys.*, 2000, vol. 355, pp. L27–30.
- [7] Vandenbussche B., Waters L.B.F.M., de Graauw Th., Decin L., Hears A., Lenorzer A., Morris P., Waelkens C., Beintema D., Feuchtgruber H., Kester D., Lanuis F., Lorente R., Salama A., Wieprecht E. The ISO Atlas of Near-Infrared Stellar Spectra and the IR Spectral Classification of Late-Type Stars / ISO beyond the peaks: The 2nd ISO workshop on analytical spectroscopy. A. Salama A., Kessler M.F., Leech K., Schulz B. eds. ESA SP-456. 2000, p. 147.
- [8] Skrutskie M.F., Cutri R.M., Stiening R., Weinberg M.D., Schneider S., Carpenter J.M., Beichman C., Capps R., Chester T., Elias J., Huchra J., Liebert J., Lonsdale

- C., Monet D.G., Price S., Seitzer P., Jarrett T., Kirkpatrick J.D., Gizis J., Howard E., Evans T., Fowler J., Fullmer L., Hurt R., Light R., Kopan E.L., Marsh K.A., McCallon H.L., Tam R., Van Dyk S., Wheelock S. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astrophys. J.*, 2006, vol. 131, p. 1163.
- [9] Levasseur-Regoued A.C., Dumont R. Absolute Photometry of Zodiacal Light. *Astron. Astrophys.*, 1980, vol. 84, pp. 277–279.
- [10] Hoffmann W., Lemke D., Thum C. Surface Brightness of the Central Region of the Milky Way at 2.4 and 3.4 micrometers. *Astron. Astrophys.*, 1977, vol. 57, pp. 111–114.
- [11] Hoffmann B., Tappert C., Schlosser W., Schmidt-Kaler Th., Kimeswenger S., Seidensticker K., Schmidtbreich L., Hovest. W. Photographic surface photometry of the Southern Milky Way VIII. High-resolution U; V and R surface photometries of the Southern Milky Way. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1998, vol. 128, pp. 417–422.
- [12] Kent S.M., Dame T.M., Fazio G. Galactic Structure from the SpaceLab Infrared Telescope. II. Luminosity Models of the Milky Way. *Astrophys. J.*, 1991, vol. 378, pp. 131–138.
- [13] Kent S.M., Mink D., Fazio G., Koch D., Melnick G., Tardiff A., Maxon C. Galactic Structure from the SpaceLab Infrared Telescope. I. 2.4 Micron Map. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1992, vol. 78, pp. 403–408.
- [14] Kimeswenger S., Hoffmann B., Schlosser W., Schmidt-Kaler Th. Photographic surface photometry of the Milky Way. VII. High-resolution B surface photometry of the Milky Way. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1993, vol. 97, pp. 517–525.
- [15] Lillie C.F., Witte A.N. Ultraviolet Photometry from the Orbiting Astronomical Observatory. XXV. Diffuse Galactic Light in the 1500–4200 Å Region and the Scattering Properties of Interstellar Dust Grains. *Astrophys. J.*, 1976, vol. 208, pp. 64–74.
- [16] Murthy J., Henry R.C., Feldman P.D., Tennyson P.D. Observations of the diffuse near-UV radiation field. *Astron. Astrophys.*, 1990, vol. 231, pp. 187–198.
- [17] Schmidtbreich L., Schlosser W., Koczet P., Wiemann S., Jütte M. Photographic surface photometry of the Southern Milky Way. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1998, vol. 132, pp. 21–27.
- [18] Winkler Chr., Pfeleiderer J., Schmidt-Kaler Th. The Milky Way in ultraviolet spectral region. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1984, vol. 58, pp. 705–728.
- [19] Паренаго П.П. *Курс звездной астрономии*. Москва: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1954. 476 с.
- [20] Мошкaлëв В.Г., Бирюков А.В., Захаров А.И., Крусанова Н.Л., Миронов А. В., Николаев Ф.Н., Прохоров М.Е., Тучин М.С. Расчет блеска звезд в спектральной полосе кремниевого фотоприемника звездного датчика по данным каталогов Tycho-2 и 2MASS. Аванесов Г.А., ред / Сб. тр. Третьей Всерос. научн.-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Москва: ИКИ РАН. Механика, управление и информатика, 2013. с. 243–248.
- [21] Roach F.E. The Light of the Night Sky: Astronomical, Interplanetary and Geophysical. *Space Science Reviews*, 1964, vol. 3, pp. 512–540.
- [22] Code A.D., Holm A.V., Bottemiller R.L. Ultraviolet photometry from the orbiting astronomical observatory. XXXIV. Filter photometry of 531 stars of diverse types. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1980, vol. 43, pp. 501–545.

- [23] Fluks M.A., Plez B., The P.S., de Winter D., Westerlund B.E., Steenman H.C. On the spectra and photometry of M-giant stars. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1994, vol. 105, p. 311.
- [24] Jalinsky P. *Scatter Sources for SNAP*. Lawrence Berkeley National Lab. 2004. URL: <http://snap.lbl.gov/pub/bscw.cgi/S4e701dlf/dl02752/SNAP-TECH-04020.doc> (date: 13.09.2011)
- [25] Morgan D. H., Nandy K., Thompson G. L. Ultraviolet observations of the diffuse galactic light from the S2/68 sky-survey telescope. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1978, vol. 185, pp. 371–380.

Жуков Александр Олегович — д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН, старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ. e-mail: aozhukov@mail.ru

Захаров Андрей Игоревич — научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ. e-mail: zakh@sai.msu.ru

Прохоров Михаил Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий лабораторией Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ. e-mail: mike.prokhorov@gmail.com

Шахов Николай Иванович — канд. техн. наук, докторант 4-го Центрального научно-исследовательского института Минобороны России. e-mail: shahoffnik@mail.ru

Гедзюн Виктор Станиславович — аспирант Института астрономии РАН. e-mail: victorgedzyun@mail.ru

Гладышев Анатолий Иванович — канд. техн. наук, начальник Научно-исследовательской лаборатории Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого. e-mail: tolya_gladyshev@mail.ru

Simulation of the sky background in a wide spectral range in near-Earth space

© A.O. Zhukov^{1,3}, A.I. Zakharov¹, M.E. Prokhorov¹,
N.I. Shakhov², V.S. Gedzyun³, A.I. Gladyshev⁴

¹ Stenberg Astronomical Institute

² The 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation

³ Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

⁴ Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great

At present, the simulation of the sky background in near-Earth space is carried out with using astronomical spectral bands. Occasionally recalculation is carried out with spectral types (excluding interstellar reddening). As a result we obtain inaccurate data (refers to the accuracy of the flow of light sources) in an existing directories which are used by system of orientation and navigation of satellites. This leads in the spectral band of the device to the

appearance of star-interference, in some cases, and to disappearance of navigational stars in others cases. Also a wide spectral band of the device causes the difficulties of recalculation of flows from the stars. The present article analyzes the background stellar environment with extra-atmospheric observations of space objects in the spectral range 0,17-0,3, 0.4-0.7, 3-5 micron and in spectral band of V Johnson. The spatial distribution of the background brightness of the sky observed from space was simulated, in each range and spatial distribution of stars depending on the distance from the Galactic plane. Determined the average brightness of the sky background in each of the spectral channels. Data of the well-known catalogs adapted to the sensitivity range of flint photodetectors (both in coordinate measurements (photo center of a double star, consisting of stars with different spectrum is shifted depending on the spectral range of the detector), and on non-coordinate measurements (obtained more accurate radiation flows)).

Keywords: sky background, astronomical spectral bands, navigational stars, photodetectors, radiation flows.

Zhukov A.O., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor; Senior reasarcher at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Leading researcher of the Stenberg Astronomical Institute. e-mail: aozhukov@mail.ru

Zakharov A.I., researcher of the Stenberg Astronomical Institute. e-mail: zakh@sai.msu.ru

Prokhorov M.E., Dr. Sci. (Math. & Phys.), Head of laboratory at the Stenberg Astronomical Institute. e-mail: mike.prokhorov@gmail.com

Shakhov N.I., Cand. Sci. (Eng.), doctoral at the 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation. e-mail: shahoffnik@mail.ru

Gedzyun V.S., post-graduate student of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. e-mail: victorgedzyun@mail.ru

Gladyshev A.I., Cand. Sci. (Eng.), Head of laboratory at the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great. e-mail: tolya_gladyshev@mail.ru