МБОУ СОШ №56 г. Пензы им. Героя России А.М. Самокутяева

II Региональный фестиваль творческих открытий

и инициатив «Леонардо»

ФИЗИКА

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА

ПРОНИЦАЮЩАЯ СИЛА ТЕЛЕСКОПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАСВЕТКИ ФОНА НЕБА

Выполнил:
Палымбетов Амирхан,
МБОУ СОШ №56 г. Пензы
им. Героя России А.М. Самокутяева,
10 «А» класс
Руководитель:
Глухов Павел Викторович,
учитель физики
МБОУ СОШ №56 г. Пензы им. Героя России А.М. Самокутяева

Пенза, 2022

Содержание

Используемые сокращения и обозначения 3

Введение 4

1. Методика экспериментальных измерений 5

2. Результаты измерений 7

3. Анализ результатов измерений 10

Заключение 14

Литература и источники 15

Приложения 16

Используемые сокращения и обозначения

M – предельная звездная величина, видимая в телескоп, m

NELM / m – предельная звездная величина, видимая невооруженным глазом, m

D – апертура телескопа, мм

d – диаметр зрачка глаза, мм

Г – увеличение телескопа

k – коэффициент светопропускания оптической системы

B – яркость фона неба для невооруженного глаза, кд/м^2

B_0 – яркость фона неба при наблюдении в телескоп, кд/м^2

I – пороговая интенсивность для невооруженного глаза, Вт/м^2

I_0 – пороговая интенсивность при наблюдении в телескоп, Вт/м^2

S – поверхностная яркость фона неба для невооруженного глаза, m/сек^2

S_0 – поверхностная яркость фона неба при наблюдении в телескоп, m/сек^2

SQM – Sky Quality Meter, прибор для измерения поверхностной яркости фона неба

Введение

В настоящее время перед астрономами-любителями остро стоит проблем светового загрязнения (искусственной засветки фона неба). Искусственная засветка накладывает существенные ограничения на возможности наблюдения астрономических объектов как невооруженным глазом, так и при использовании оптических инструментов. Для основательных астрономических наблюдений требуется выезд в серую зону засветки, начинающуюся на расстоянии десятков (для мегаполисов – сотен) километров от границ города. Однако выезд из города даже на десятки километров не всегда представляется возможным. В частности, никоим образом не представляется возможным ночной выезд за город группы школьников. Это обусловливает необходимость проведения наблюдений в городе в условиях искусственной засветки. Это в свою очередь ставит задачу определения того, какие астрономические объекты в принципе можно наблюдать в городе при сильной искусственной засветке.

Все вышеперечисленное определило **актуальность** выбранной темы исследования.

В 2020 году в МБОУ СОШ №56 г. Пензы им. Героя России А.М. Самокутяева в рамках научно-практической конференции была выполнена работа по теоретической оценке проницающей силы телескопа (для точечных объектов) при визуальных наблюдениях в зависимости от уровня засветки. Краткий вывод теоретической зависимости приведен в Приложении к настоящей работе.

Цель настоящей исследовательской работы – экспериментально проверить (и при необходимости скорректировать) полученную ранее оценочную теоретическую зависимость предельной звездной величины точечного объекта от апертуры телескопа и засветки фона неба при визуальных наблюдениях.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие **задачи**

- разработать методику проведения экспериментальных исследований;
- провести экспериментальные измерения проницающей силы телескопа для точечных объектов при различных уровнях засветки;
- сравнить полученные экспериментальные значения с расчетными;
- по результатам анализа экспериментальных данных проверить возможность наблюдения в условиях городской засветки слабых точечных объектов и определить их предельную звездную величину.

Теоретическая значимость и **практическая ценность** заключается в возможности использовать результаты исследования для:

1. Оценки того, что можно увидеть в телескоп заданной апертуры в различных условиях.

2. Определения места наблюдения в зависимости от того, какой объект необходимо увидеть в телескоп заданной апертуры.

3. Проведения лабораторных работ по астрономии.

4. Подготовке к олимпиадам по астрономии и физике.

Объект исследования – телескоп.

Предмет исследования – проницающая сила телескопа.

Методы исследования – математические расчёты и астрономические наблюдения,

Цели и задачи исследования определили **структуру и объем работы**, которая состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников и приложения.

1. Методика экспериментальных измерений

В рамках настоящей работы посредством визуальных астрономических наблюдений проводились измерения проницающей силы телескопа (предельной звездной величины) в зависимости от апертуры телескопа и засветки фона неба. Различные уровни засветки моделировались заходящим/восходящим Солнцем и Луной. В качестве рабочего инструмента использовался рефлектор Ньютона с апертурой 200 мм и фокусным расстоянием 1260 мм, при этом другие апертуры (140 мм и 100 мм) моделировались соответствующими диафрагмами, надеваемыми на объектив телескопа.

Измерения проводились в окрестностях Капеллы (созвездие Возничий). Выбор области неба был обусловлен тем, что в момент проведения наблюдений (декабрь 2021 г.) у Капеллы была как вечерняя, так и утренняя видимость.

При измерениях на заходе/восходе Солнца высота Капеллы не превышала 35°, что снижало предельную видимую звездную величину. При измерениях на заходе Луны Капелла находилась вблизи зенита.

Засветка места наблюдения в соответствии со спутниковыми данными о световом загрязнении составляет 21 m [8]. Исходя из опыта наблюдений автора настоящей работы реальная засветка зимнего неба в месте наблюдения составляет 20,5 m.

При измерениях детектировалось появление (на заходе светила) или исчезновение (на восходе светила) звезды, ее звездная величина, а также время появления/исчезновения звезды.

Звездная величина определялась в соответствии с картами [12].

Время детектирования использовалось для расчета засветки фона неба и NELM в соответствии с формулами Bradley E. Schaefer [9], программами [10] и [11] (аналогичный алгоритм используется в программе Stellarium). Координаты звезд и светил на каждый конкретный момент времени определялись с использованием программы Stellarium и [11].

Появление/исчезновение звезд определялось визуально. Появление звезды детектировалось в тот момент, когда звезда становилась отчетливо видна боковым зрением. Опытным путем установлено, что на заходе светила через несколько (5-10) минут после четкого детектирования боковым зрением, звезда становится четко детектируемой прямым зрением (за счет дальнейшего

уменьшения засветки)[1]. Исчезновение звезды детектировалось аналогичным образом (когда звезда переставала четко детектироваться боковым зрением).

Погрешность времени появления/исчезновения звезды составляла не менее 1 минуты и могла доходить до 2-3 минут.

Практика показала, что проводить измерения одновременно на нескольких апертурах, снимая/одевая и поворачивая диафрагмы, а также отмечая звезды на нескольких картах одновременно, в условиях зимних наблюдений не представляется возможным. Подходящее для наблюдений ясное зимнее небо появляется при низких температурах (-15…-25ºC). Низкая температура и высокая скорость изменения засветки от Солнца затрудняет работу одновременно с несколькими звездными картами. Поэтому для каждой апертуры измерения проводились в отдельные дни, что снижало количество экспериментальных данных (в довесок к ограниченному количеству ясных безоблачных ночей).

Фокусное расстояние окуляра побиралось таким образом, чтобы увеличение было близко к проницающему (0,7D).

Наибольший интерес в плане точности результатов представляли измерения проницающей силы в зависимости от засветки Луны, т.к. скорость изменения засветки от Луны значительно меньше скорости изменения засветки от Солнца. Однако практика показала, что в условиях низких температур зимних наблюдений оптика (зеркала) телескопа 200 мм цельного Ньютона начинает активно запотевать через 3,5-4 часа наблюдений, в то время как для наблюдения полного цикла восхода и захода Луны необходимо проводить наблюдения в течение 6-7 часов. Имеющийся в распоряжении автора телескоп относительно малой апертуры 200 мм не был оборудован специальными вентиляторами и грелками, предназначенными для обогревания оптики (такие вентиляторы и грелки как правило ставятся на любительские инструменты с апертурой от 250 мм и выше). Более того, при зимних наблюдениях приходится уделять пристальное внимание не только (и не столько) термостабилизации оптики, но и термостабилизации наблюдателя.

В связи с этим было проведено всего лишь одно относительно короткое наблюдение на заходе Луны.

Всего было проведено 5 успешных наблюдений[2] (см. Таблицу 1).

[1] За исключением случаев в конце наблюдений, когда засветка выходила на плато.

[2] Общее количество наблюдений было в разы выше.

Таблица 1 – Виды проведенных измерений

№	Апертура, мм	Фокусное расстояние окуляра, мм	Моделирование засветки
1	200	8	Восход Солнца
2	200	8	Заход Луны
3а	140	12	Заход Солнца
3б	140	12	Восход Солнца
4	100	12	Заход Солнца

Теоретические значения рассчитывались в соответствии с формулой (8) Приложения:

$$M = m - 2{,}5lgd + 1{,}25lgk + 5lgD \text{ (1)}$$

Для измерений 1 и 2 Таблицы 1 для расчетов использовались следующие параметры:

D=200, Г=158, d=6, k=0,51 (см. Приложение), что давало формулу расчета проницающей силы телескопа:

$$M = m + 8{,}946 \text{ (1а)}$$

Для измерений 3а и 3б Таблицы 1 для расчетов использовались следующие параметры:

D=140, Г=100, d=6, k=0,51, что давало формулу расчета проницающей силы телескопа

$$M = m + 8{,}073 \text{ (1б)}$$

Для измерения 4 Таблицы 1 для расчетов использовались следующие параметры:

D=100, Г=100, d=6, k=0,51, что давало формулу расчета проницающей силы телескопа

$$M = m + 7{,}7 \text{ (1в)}$$

В качестве значения параметра m использовалась расчетная NELM.

Таким образом, по результатам анализа имеющихся технических и физических возможностей и ограничений была разработана методика проведения экспериментальных измерений. Данная методика позволила в дальнейшем получить экспериментальные данные и проанализировать их путем сравнения с теоретическими расчетными значениями.

2. Результаты измерений

Таблица 2 – Результаты измерений

№	Описание	Время детектирования звезды	B, рефракционная засветка, нЛб	Bmoon, засветка от Луны, нЛб	Btwi, сумеречная засветка, нЛб	Btotal, Интегральная засветка фона неба, нЛб	S, Интегральная засветка фона неба, зв. вел. / кв. угл. сек	NELM, расчетная предельная видимая невооруженным глазом звездная величина, зв. вел.	M, Расчетная предельная звездная величина, зв. вел.	M, Предельная звездная величина, видимая в телескоп, зв. вел.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	13.12.2021, D=200, восход Солнца	7:15	118	0	111580	111698	13,71	3,17	12,12	8,8
		7:12	118	0	77017	77135	14,11	3,28	12,23	9,0
		7:09	118	0	53162	53280	14,51	3,37	12,32	9,8
		7:03	117	0	25330	25447	15,32	3,51	12,46	10,5
		6:59	117	0	15938	16055	15,82	3,58	12,53	10,9
		6:56	117	0	11002	11119	16,22	3,62	12,57	11,1
		6:52	117	0	6310	6427	16,81	3,68	12,63	12,4
		6:46	116	0	3007	3123	17,59	3,73	12,68	13,5
		6:30	113	0	393	506	19,57	4,75	13,70	13,0
		6:25	112	0	206	318	20,07	5,09	14,04	13,5
		6:23	113	0	156	269	20,26	5,21	14,16	14,2
2	12.12.2021, D=200, заход Луны	23:35	93	286	0	379	19,88	5,17	14,06	14,5
		23:43	91	280	0	371	19,91	5,18	14,08	14,6
		23:43	91	274	0	365	19,92	5,18	14,08	14,7
		23:52						5,20	14,16	14,8
		0:15	93	261	0	354	19,96	5,22	14,23	14,9
		0:50	93	246	0	339	20,01	5,26	14,31	15,1
		1:15	94	233	0	327	20,05	5,28	14,37	15,4
3а	26.12.2021, Dэфф=140,	17:15	112	0	979	1091	18,74	4,21	12,28	12,6
		17:19	112	0	617	729	19,17	4,55	12,62	13,5

	заход Солнца	17:20	112	0	513	625	19,34	4,67	12,74	13,7
		17:22	112	0	389	501	19,58	4,85	12,92	13,8
		17:25	112	0	268	381	19,88	5,05	13,12	14,2
		17:27	112	0	204	316	20,08	5,19	13,26	14,3
		17:27	112	0	204	316	20,08	5,19	13,26	14,5
		17:29	112	0	170	282	20,21	5,27	13,34	14,6
3б	27.12.2021, Dэфф=140, восход Солнца	7:42	120		1570090	1570210	10,84	1,75	9,82	7,6
		7:40	120		1304972	1305092	11,04	1,86	9,93	8,4
		7:34	120		622780	622900	11,84	2,28	10,35	9,0
		7:20	120		117934	118054	13,65	2,95	11,02	10,2
		7:15	120		61752	61872	14,35	3,12	11,19	10,9
		7:14	120		56301	56421	14,45	3,14	11,21	10,9
		7:05	120	257	18574	18951	15,64	3,34	11,41	12,4
		7:09	120	257	32337	32714	15,04	3,30	11,37	10,5
		6:49	120		32422	32542	15,05	3,57	11,64	13,0
		7:00	120		9083	9203	16,42	3,47	11,54	13,4
		6:43	123	248	1085	1456	18,42	3,75	11,82	13,5
		6:30	121	252	193	566	19,45	4,56	12,63	14,2
4	27.12.2021, Dэфф=100, заход Солнца	17:04	110	0	4539	4649	17,16	3,75	11,45	11,1
		17:08	110	0	2810	2920	17,67	3,81	11,51	11,5
		17:07	110	0	3083	3193	17,57	3,80	11,50	11,9
		17:10	110	0	2081	2191	17,98	3,83	11,53	12,4
		17:11	110	0	1897	2007	18,07	3,84	11,54	12,6
		17:15	110	0	1087	1197	18,64	4,13	11,83	13,0
		17:19	111	0	667	778	19,10	4,50	12,20	13,0
		17:24	111	0	349	460	19,67	4,91	12,61	13,4
		17:30	111	0	147	258	20,30	5,35	13,05	13,5
		17:31	111	0	134	245	20,36	5,38	13,08	13,7

В Таблице 2 приведены экспериментальные данные, полученные в ходе астрономических наблюдений.

В столбце 3 приведено время детектирования звезды.

В столбце 7 приведена интегральная[3] засветка, являющаяся суммой засветок столбцов 4-6 (рефракционная, лунная, солнечная засветка).

В столбце 8 приведена интегральная засветка, пересчитанная в звездных величинах на квадратную угловую секунду.

В столбце 9 приведена расчетная (теоретическая) NELM.

В столбце 10 приведена расчетная (теоретическая) предельная видимая в телескоп звездная величина.

В столбце 11 приведена экспериментально измеренная предельная видимая в телескоп звездная величина.

Таким образом, на основе разработанной ранее методики были проведены астрономические наблюдения и получен массив экспериментальных данных для последующего анализа.

[3] Без учета искусственной зимней засветки, составляющей в месте наблюдения около 20,5 m.

3. Анализ результатов измерений

На Рис.1-5 приведены зависимости расчетной и экспериментальной проницающей силы телескопа от расчетной NELM.

Из общей картины выбиваются экспериментальные данные, представленные на графике рис.1 (D=200, восход Солнца). Так, в части графика, соответствующей темному небу (расчетная NELM более 3,5) экспериментальная проницающая сила оказалась немного ниже расчетной – в отличие от других измерений, где на аналогичном небе экспериментальные значения оказались выше расчетных. Причины этого не до конца ясны, однако в других измерениях для той же апертуры (D=200, заход Солнца), результаты которых не приведены в настоящей работе (из-за малого временного интервала измерений), экспериментальная проницающая сила на темном небе оказывалась выше расчетной, также как и на графиках рис.2-5.

Единственная точка графика Рис.1, лежащая выше расчетной кривой, соответствует звезде с координатами 5 ч 12 мин 00 с и +45° 41’ 33’’. Блеск данной звезды в соответствии со звездными картами составляет 13,5 m. Однако все проведенные измерения показывали, что реальный блеск этой звезды в момент наблюдения составлял не более 12,5-13 m.

Анализ оставшихся графиков Рис.2-5 позволяет сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные значения проницающей силы телескопа оказались выше расчетных при высотах Солнца от -10° до -16° (при засветке фона неба лучше, чем 16-17 m и расчетной NELM более 3,0-3,5 m) и ниже расчетных при высоте Солнца более -10° (засветка и расчетная NELM хуже, чем 16 m и 3 m соответственно).

Более низкие значения проницающей силы при ярком небе обусловлены, вероятно, особенностями человеческого зрения (при такой засветке уменьшается зрачок глаза d, включается дневное зрение, и т.д). В то же время для яркого неба формула (1) работает значительно лучше при использовании в качестве m реальной NELM вместо расчетной (см. Рис.6 Приложения)

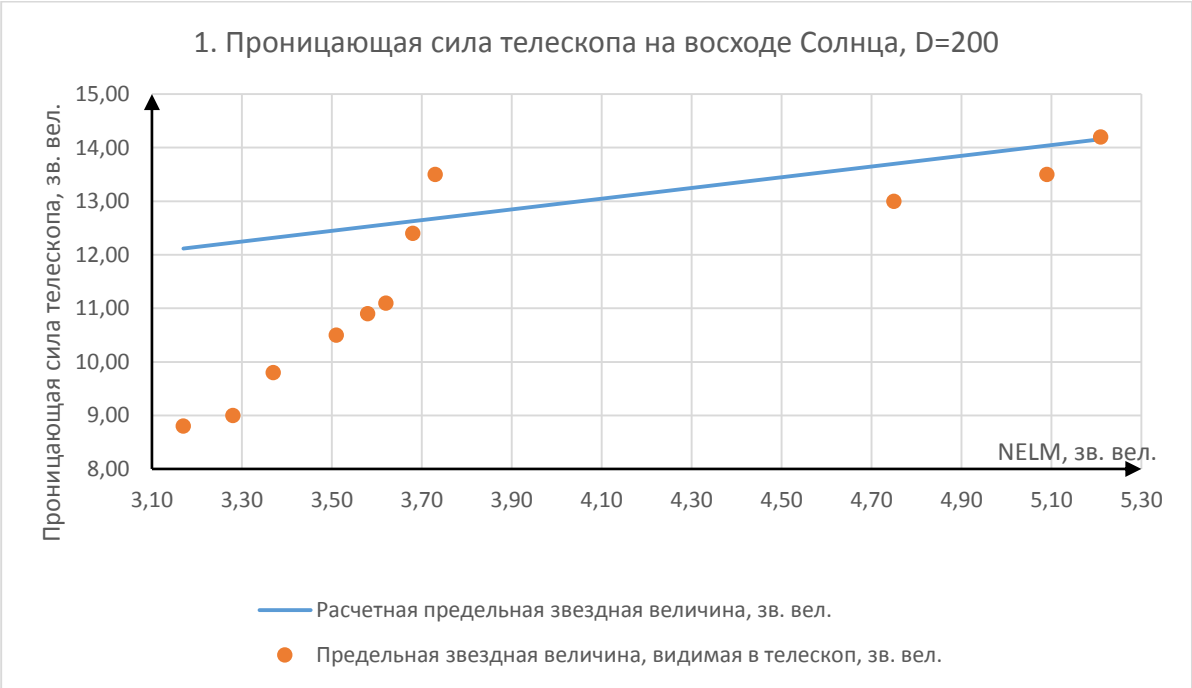
Превышение экспериментально определенной проницающей силы телескопа над расчетной на темном небе достигало 1 m. С учетом методики определения проницающей силы (детектирование звезды осуществлялось боковым зрением, наличие существенных погрешностей и т.д.) **формула (1) может использоваться для оценки нижней границы проницающей силы телескопа при типичных уровнях городской засветки, не превышающей 16 m.**

2. Как и ожидалось, проницающая сила телескопа даже при засветке хуже 20,5 m оказалась выше паспортной (15,4 m при засветке хуже[4] 20,5 m против паспортной 14,2 m). При аппроксимировании проницающей силы телескопа для засветки серой зоны (21,5 m) можно ожидать возрастания проницающей силы до 16 m.

Более того, **проницающая сила телескопа позволяет наблюдать достаточно слабые объекты даже в условиях городской засветки.** При типичных условиях засветки г. Пензы в тени фонарей уличного освещения можно добиться засветки фона, не превышающей 17-18 m. При такой засветке нижняя граница проницающей силы 200 мм рефлектора Ньютона будет составлять 12,5-13 m, что достаточно для наблюдения большей части ярких рассеянных и шаровых скоплений каталога Месье, а также представляющих интерес отдельных точечных объектов (переменные звезды, двойные звезды и пр.) и астеризмов. Также, возможно, проницающей силы телескопа также окажется достаточно для наблюдения в городе наиболее ярких туманностей и галактик.

3. Формула (1) относительно хорошо работает на разных апертурах.

4. В момент проведения наблюдений звезда с координатами 5 ч 12 мин 00 с и +45° 41’ 33’’ имела блеск в пределах 12,5-13 m, в то время как в соответствии с картой данная звезда должна иметь блеск 13,5 m (ближайшие звезды 14,9 m и 15,5 m расположены слишком далеко и на использованных увеличениях не попадали в область 2-3 угловых минут). Возможно, данная звезда является переменной (в соответствии со звездными картами она таковой не является). Представляют интерес длительные наблюдения за блеском данной звезды.



[4] Т.к. при расчетах не учитывалась искусственная засветка, составляющая зимой в месте наблюдения около 20,5 m. При более строгих расчетах для темного неба искусственную засветку необходимо суммировать с прочими засветками.

Рис.1. Измерение проницающей силы телескопа на восходе Солнца. D=200, Г=158, d=6 мм

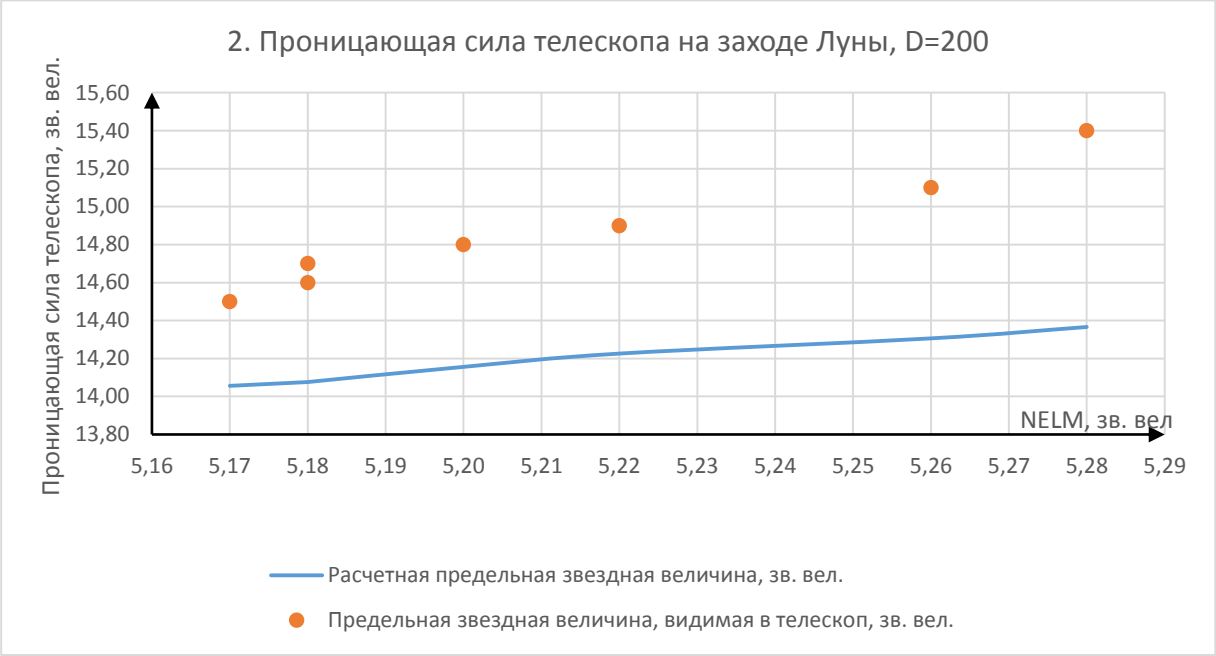


Рис.2. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Луны. D=200, Г=158, d=6 мм

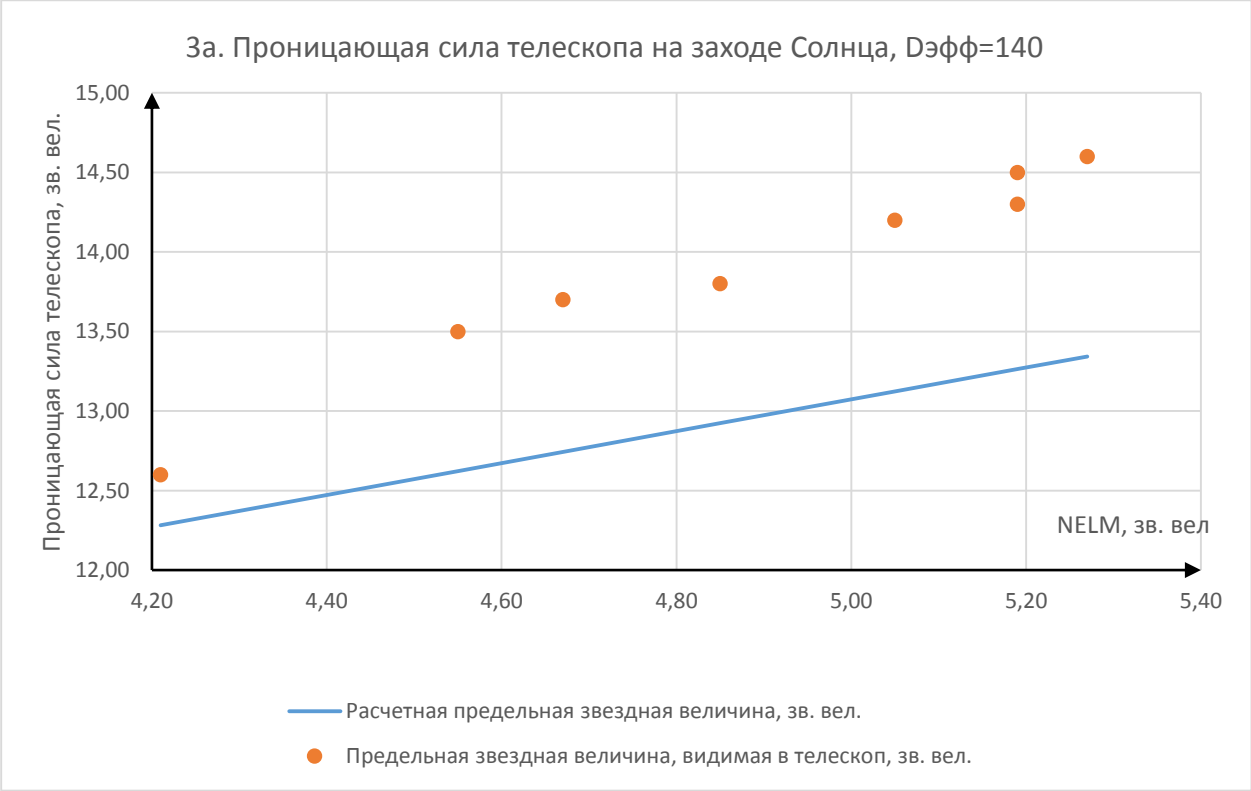


Рис.3. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Солнца. $D_{эфф}$=140, Г=100, d=6 мм

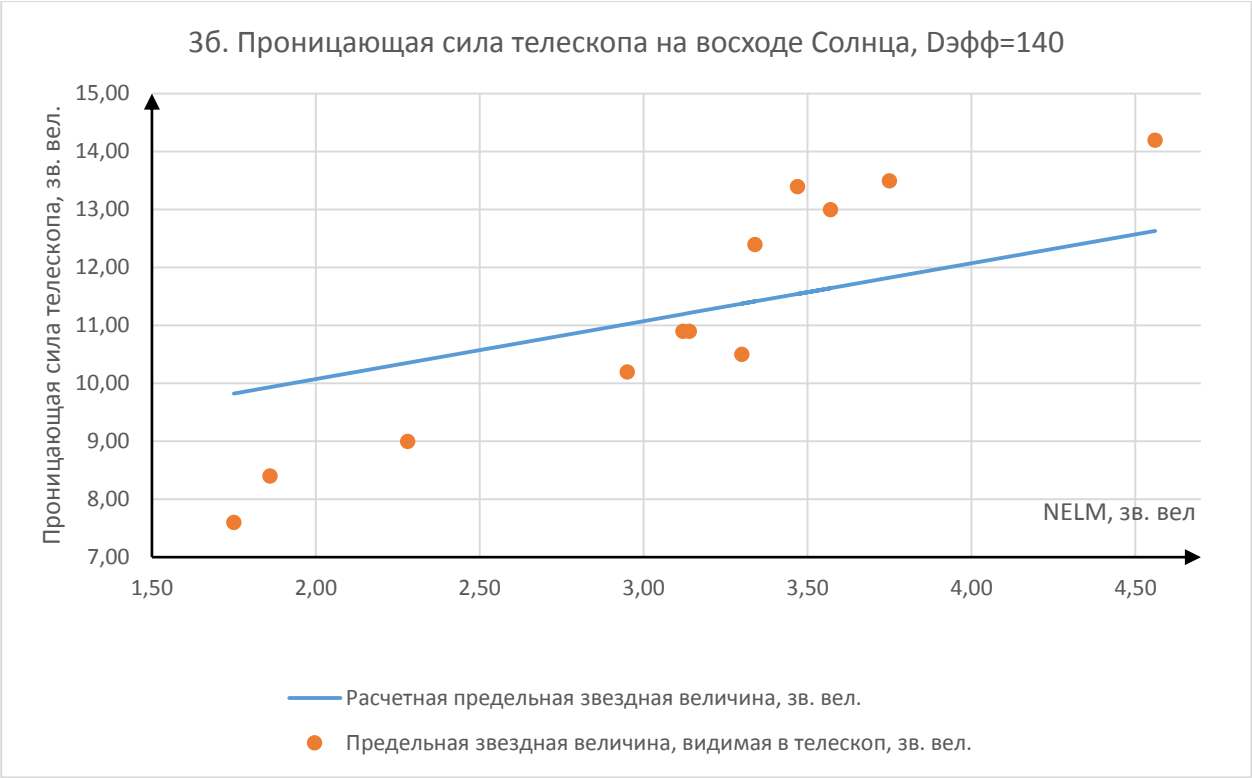


Рис.4. Измерение проницающей силы телескопа на восходе Солнца. $D_{эфф}$=140, Г=100, d=6 мм

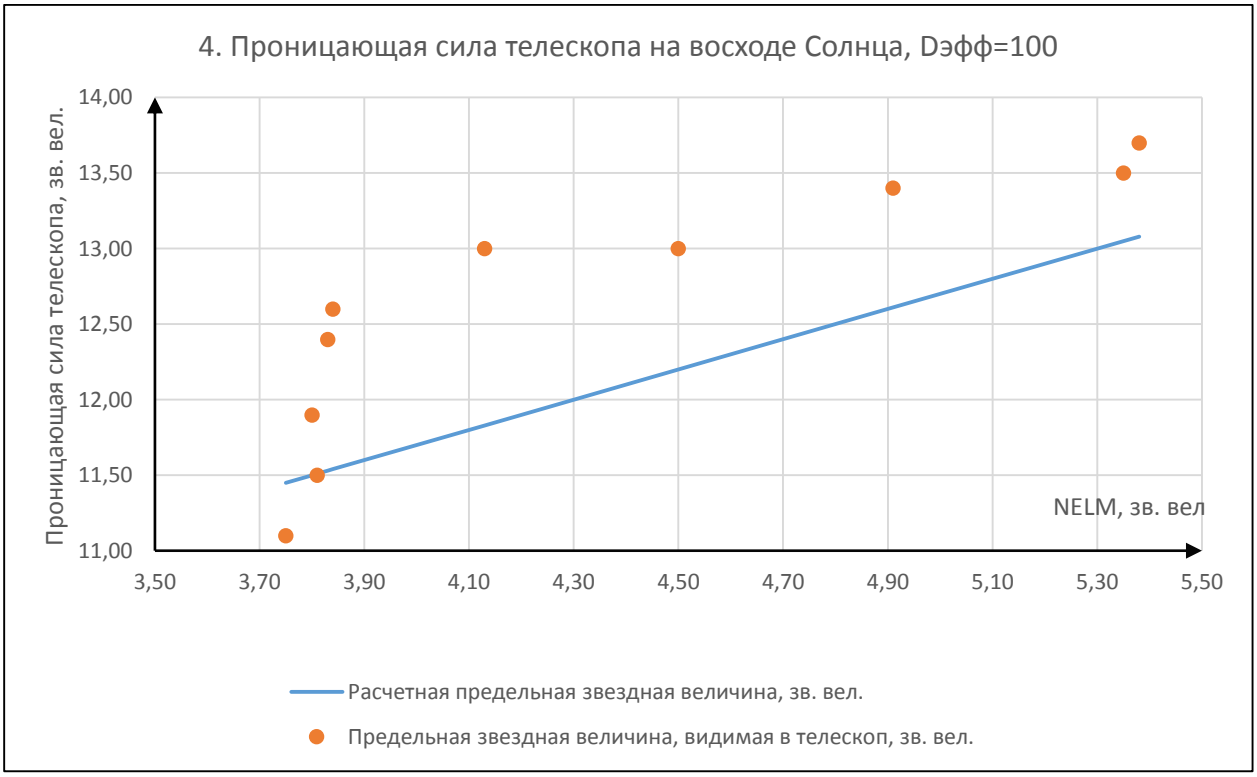


Рис.5. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Солнца. $D_{эфф}$=100, Г=100, d=6 мм

Таким образом, в ходе настоящей работы был осуществлен анализ массива экспериментальных данных, в ходе которого была проверена корректность теоретической зависимости проницающей силы телескопа от уровня засветки фона неба.

В частности, показано, что формула (1) может использоваться для оценки нижней границы проницающей силы телескопа при типичных уровнях городской засветки, не превышающей 16 m. Для засветки хуже 16 m возможно оценочное использование формулы (1), в которой в качестве параметра m следует брать реальную (не расчетную[5]) NELM.

При этом проницающая сила телескопа позволяет наблюдать достаточно слабые объекты даже в условиях городской засветки. При типичных условиях засветки г. Пензы в тени фонарей уличного освещения можно добиться засветки фона, не превышающей 17-18 m. При такой засветке нижняя граница проницающей силы 200 мм рефлектора Ньютона будет составлять 12,5-13 m,

[5] Расчетная NELM в настоящей работе выступает в роли параметра, который использовать удобнее, чем уровень засветки фона S (между расчетной NELM и S имеется взаимно однозначное соответствие, см. Приложение и [9]).

Заключение

В ходе выполнения работы:

- по результатам анализа имеющихся возможностей и ограничений разработана методика проведения экспериментальных исследований;
- с использование разработанной методики проведены экспериментальные измерения проницающей силы телескопа для точечных объектов при различных уровнях засветки и апертурах, по результатам которых был получен массив экспериментальных данных;
- проанализирован массив полученных экспериментальных данных;
- по результатам анализа экспериментальных данных подтверждена корректность теоретической зависимости при типичных уровнях городской засветки и возможность наблюдения в условиях городской засветки слабых точечных объектов;
- определена предельная звездная величина точечных объектов в условиях городской засветки. В частности, была экспериментально подтверждена возможность наблюдения в 200 мм рефлектор Ньютона в условиях городской засветки точечных объектов блеском до 13 m, что достаточно для наблюдения большей части интересных рассеянных и шаровых скоплений каталога Месье.

Все цели работы достигнуты, а задачи выполнены.

Литература и источники

1. Максутов Д.Д. Астрономическая оптика. – М.: Л.: Наука, 1979. – 396 с.
2. Сикорук Л.Л. Библиотека любителя астрономии. Телескопы для любителей астрономии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 368 с.
3. Михайлов А.А. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т.1 – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 608 с.
4. Kolman R.S., Rev. Pop. Astr. 61, 28, 1967.
5. Bowen I.S., PASP 59, 253, 1947.
6. С. Плакса «Астрономические наблюдения в городе. Астроклимат» https://prozarium.ru/TextDetails.aspx?TextID=2081
7. Хацевич Т.Н. Медицинские оптические приборы. Физиологическая оптика. – учеб. пособие. 3-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 135 с.
8. Спутниковая карта засветки ночного неба https://www.lightpollutionmap.info/#zoom=8.50&lat=52.9066&lon=44.3356&layers=0BFFFFFTFFFFFTFFFF
9. Schaefer, Bradley E., “To the Visual Limits”, Sky & Telescope, 95 (1998), nr. 5, 57-60 [ADS link].
10. http://www.archaeocosmology.org/eng/vislimitvrb.htm
11. Программа MagVision v7
12. http://www.astronet.ru/db/map+/

ПРИЛОЖЕНИЕ

Теоретическая оценка проницающей силы телескопа в зависимости от поверхностной яркости фона неба

Случай идеальных условий m = 6, d = 6

Анализ классической литературы показывает, что задача определения проницающей силы телескопа решается для условий идеальной засветки порядка 22 m/сек^2 (предельная звездная величина, видимая невооруженным глазом $m \geq 6$; диаметр зрачка глаза наблюдателя d = 6 мм).

Так, Максутов [1] очевидными рассуждениями выводит формулу предельной видимой звездной величины точечного объекта в условиях идеальной засветки и при равнозрачковом увеличении, т.е. при диаметре выходного зрачка, D/Г = d = 6 мм:

$$M = m + 5\lg\left({}^{D}/_{d}\right) + 2{,}5lgk \quad (1).$$

Сикорук и Михайлов [2], [3] идут дальше и для звездной величины предельно слабых звезд, видимых в телескоп, ссылаются на эмпирическую формулу И. Боуэна и Р. Колмана:

$$M = C + 2{,}5lgD + 2{,}5lg\Gamma \qquad (2),$$

в которой параметр С отвечает за качество изображения и может изменяться в пределах от 3,9 (отличное качество изображения) до 1,8 (плохое качество изображения) и менее 1,8 (очень плохое качество изображения).

В различных астрономических источниках в качестве значения параметра С берется (как правило) 2,1, при этом автору настоящей работы не удалось найти в литературе ни теоретический вывод значения С = 2,1, ни исследований, в которых это значение было получено экспериментальным путем.

Так, первоисточники формулы (2), на которую ссылаются Сикорук и Михайлов [4], [5] приводят следующий теоретический вывод формулы для М:

$$I \sim \frac{\sqrt{B}}{d^2} \qquad (3)$$

$$I_0 \sim \frac{\sqrt{B_0}}{D^2 k} \qquad (4)$$

Пороговая яркость фона для телескопа и невооруженного глаза связаны соотношением:

$$B_0 = Bk\frac{\left({}^{D}/_{d}\right)^2}{\Gamma^2} \qquad (5)$$

Учитывая, что звезды остаются точечными объектами, пока увеличение не достигнет разрешающего, то есть равного диаметру объектива, максимальная проницающая способность телескопа будет достигнута при увеличении Г = D. Подставление (5) в (4) для отношения I_0 к I дает следующее соотношение при Г = D:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{d}{D^2\sqrt{k}} \qquad (6),$$

Соотношение (6) при логарифмировании дает формулу для разности ΔM = M - m предельных звездных величин:

$$\Delta M = -2{,}5lgd + 1{,}25lgk + 5lgD \qquad (7),$$

откуда получается искомое выражение для M:

$$M = m - 2{,}5lgd + 1{,}25lgk + 5lgD \qquad (8),$$

Которое для произвольного Г (в пределах от равнозрачкового до разрешающего) преобразуется в (2), а для Г =D преобразуется в:

$$M = \mathrm{C} + 5lgD \qquad (9),$$

где коэффициент C:

$$\mathrm{C} = m - 2{,}5lgd + 1{,}25lgk \qquad (10).$$

Однако подстановка m = 6, d = 6 и k = 0,51 (для рефлекторов Ньютона отражение – 0,7, экранирование – 10%, окуляр – 90%, глаз – 90%) дает значение $\mathrm{C} \approx 3{,}7$, а не C = 2.1. Автор настоящей работы предполагает, что значение C = 2.1 получается том случае, если не учитывается ослабление засветки фона в телескопе (т.е. не учитывается отличие для засветки фона разрешающего увеличения от равнозрачкового). Действительно, в том случае, если считать, что $S_0 = S$, получается следующее выражение для параметра C:

$$\mathrm{C} = m - 5lgd + 2{,}5lgk \qquad (11),$$

которое при подстановке m = 6, d = 6 и k = 0,7 дает значение $\mathrm{C} \approx 1{,}4$. Стоит отметить, что если не учитывать светопотери, то формула (11) для m = 6, d = 6 даст значение $\mathrm{C} \approx 2{,}1$, однако нет никаких оснований не учитывать светопотери. В то же время автор настоящей работы предполагает, что значение $\mathrm{C} \approx 1{,}4$ гораздо ближе к реальности и не учитывать ослабление засветки фона имеет смысл, т.к. как бы близко к окуляру глаз не располагался глаз, на него продолжает действовать внешняя, «неокулярная» засветка фона. Соответственно использование при наблюдениях накидки – возможно – дает выигрыш вплоть до 2 звездных величин. В дальнейшем по тексту вместо зависимости (10) используется зависимость (11).

Случай реальных условий городской засветки

Формула (11) и значение $\mathrm{C} \approx 1{,}4$ выведены для идеальных условий m = 6, d = 6, что очевидно не может быть достигнуто в условиях города. Для учета городской засветки автор настоящей работы предлагает рассматривать коэффициент C как функцию от поверхностной яркости фона засветки неба S: C = C(S). При этом от S в (11) формально зависит как m, так и d, т.к. при увеличении засветки уменьшается как предельно видимая невооруженным глазом звездная величина, так и диаметр зрачка глаза: m = m(S), d = d(S).

Рассмотрим для начала зависимость m = m(S). Значение m может быть определено на месте опытным путем (по факту), однако представляется целесообразным иметь какую-то оценочную теоретическую/полуэмпирическую зависимость. При такой оценке автор настоящей работы исходил из следующих соображений: для того, чтобы глаз распознал изображение точечного объекта (звезды) на фоне неба, необходимо, чтобы звезда объект был ярче аналогичного по площади участка неба на 1-2 порядка (в отличие от более крупных протяженных объектов, для которых требования к контрасту снижаются). Нижнему пределу в 2 порядка будет соответствовать разница в 5m, т.е. предельно видимая невооруженным глазом звездная величина точечного объекта на 5 единиц больше звездной величины фона засветки с площади, соответствующей изображению звезды на сетчатке глаза. Предел разрешения глаза составляет порядка 60 секунд, что даст площадь изображения на сетчатке глаза порядка 10^4 секунд. Т.е. суммарная яркость участка засветки будет в 10^4 раз выше, чем яркость засветки с одной квадратной секунды. Соответственно в звездных величинах яркость засветки с одной квадратной минуты будет на 10m меньше поверхностной яркости засветки. В итоге предельная видимая невооруженным глазом звездная величина может быть грубо оценена как:

$$m = S - 15 \qquad (12)$$

Стоит отметить, что оценка (12) при высоких поверхностных яркостях коррелирует с данными наблюдателей с приборами SQM лишь по их нижнему пределу (см. рис. 6, [6])

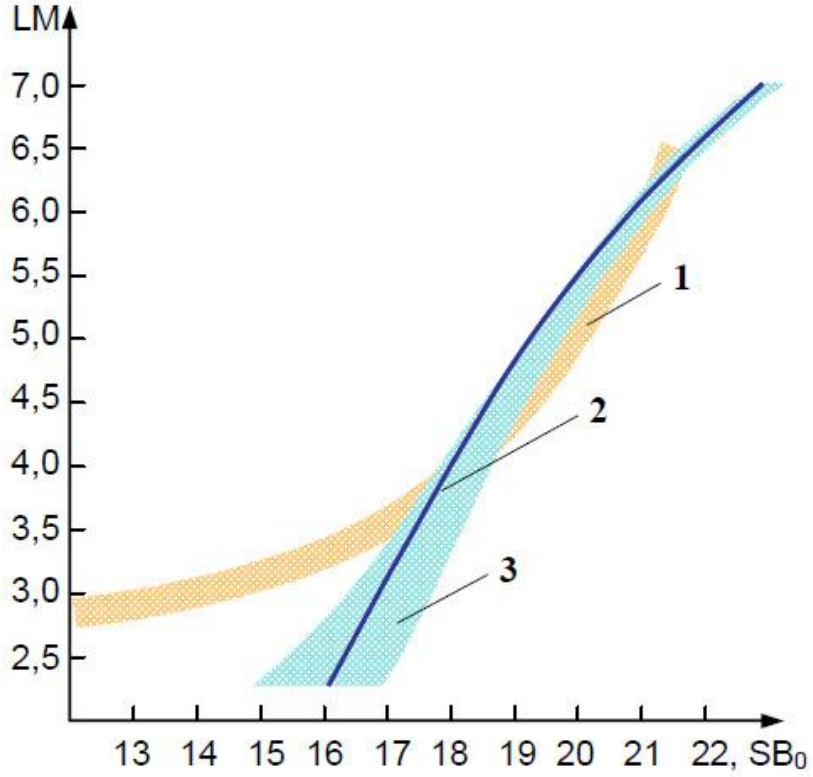


Рис. 6. График зависимости пред. звёздной величины LM (в обозначениях настоящей работы – m) от яркости фона неба SB_0 (в обозначениях настоящей работы – S) в зените для невооружённого глаза. 3 – усреднённые данные наблюдателей с SQM, в том числе в условиях городской засветки, [6].

Теперь рассмотрим зависимость диаметра зрачка глаза от засветки d = d(S). В соответствии с данными [7] нижней границе дневного зрения (при засветке 10 кд/м^2, или в пересчете S = 10 m/сек^2) соответствует диаметр зрачка от 3,5 до 4,5 мм, а нижней границе сумеречного зрения (при засветке 10^{-2} кд/м^2, или в пересчете S = 17 m/сек^2) соответствует диаметр зрачка от 5,5 до 6,5 мм. Учитывая, что уровень самой сильной городской засветки составляет порядка 18 m/сек^2, уменьшение диаметра зрачка глаза даст прирост звездной величины не более 0,4m, чем в условиях настоящей работы можно пренебречь и брать за 5lgd значение для d = 6 мм, т.е. 4m.

Таким образом, с учетом вышесказанного, зависимость C =C(S) для рефлекторов Ньютона (13) (отражение – 0,7, экранирование – 10%, окуляр – 90%, глаз – 90%, k = 0,51) и рефракторов (14) (объектив – 90%, окуляр – 90%, глаз – 90%, k = 0,73) может быть оценена как:

$$C = S - 19{,}6 \qquad (13)$$

$$C = S - 19{,}2 \qquad (14)$$

Соответственно из (13)-(14) и (9) предельно видимая в телескоп апертуры D звездная величина в зависимости от поверхностной яркости фона неба может быть оценена как (15) и (16) для рефлектора Ньютона и рефрактора соответственно:

$$M = S - 19{,}6 + 5lgD \qquad (15)$$

$$M = S - 19{,}2 + 5lgD \qquad (16)$$

При подстановке значений апертур D имеющихся в распоряжении школы телескопов (рефлектор Ньютона с D = 203 мм и рефрактор с D = 90 мм) и засветки на территории школы в соответствии с [8] S = 19 m/сек^2 получаются значения 10,9m и 9,6 m для рефлектора и рефрактора соответственно.