



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

IV открытый региональный конкурс
исследовательских и проектных работ школьников
«Высший пилотаж - Пенза» 2022

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, 2021

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, mm

d – диаметр зрачка глаза, mm

Γ – 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, $т/сек^2$

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

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 обуславливает 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 проникающей 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 проникающей 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 – проникающая 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 проникающей 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 ($-15\dots-25^\circ\text{C}$). 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).

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

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 обогрева 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 наблюдений² (см. Таблицу 1).

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:

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

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:

$$M = m + 8,946 \quad (1a)$$

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

$$M = m + 8,073 \quad (1б)$$

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

$$M = m + 7,7 \quad (1в)$$

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 Общее количество наблюдений было в разы выше.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Таблица 2 – Результаты измерений

№	Описание	Время детектирования звезды	B , рефракционная засветка, нЛб	B_{moon} , засветка от Луны, нЛб	B_{twi} , сумеречная засветка, нЛб	B_{total} , 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,	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

	заход Луны	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, Дэфф=140, заход Солнца	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
		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
3 б	27.12.2021, Дэфф=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, Дэфф=100, заход	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

Солнца	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 интегральная³ 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 м.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

На Рис.1-5 приведены зависимости расчетной и экспериментальной проникающей 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 проникающая 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 проникающая 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 $+45^{\circ} 41' 33''$. 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 проникающей 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 проникающей 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 проникающей силы телескопа над расчетной на темном небе достигало 1 m. С учетом методики определения проникающей силы (детектирование звезды осуществлялось боковым зрением, наличие существенных погрешностей и т.д.) **формула (1) может использоваться для оценки нижней границы проникающей силы телескопа при типичных уровнях городской засветки, не превышающей 16 m.**

2. Как и ожидалось, проникающая сила телескопа даже при засветке хуже 20,5 m оказалась выше паспортной (15,4 m при засветке хуже⁴ 20,5 m против паспортной 14,2 m). При аппроксимировании проникающей силы телескопа для засветки серой зоны (21,5 m) можно ожидать возрастания проникающей силы до 16 m.

Более того, **проникающая 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 проникающей силы 200 мм рефлектора Ньютона будет составлять 12,5-13 m, что достаточно для наблюдения большей части ярких рассеянных и шаровых скоплений каталога Мессье, а также представляющих интерес отдельных точечных объектов (переменные звезды, двойные звезды и пр.) и астеризмов. Также, возможно,

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.

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 $+45^{\circ} 41' 33''$ 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.

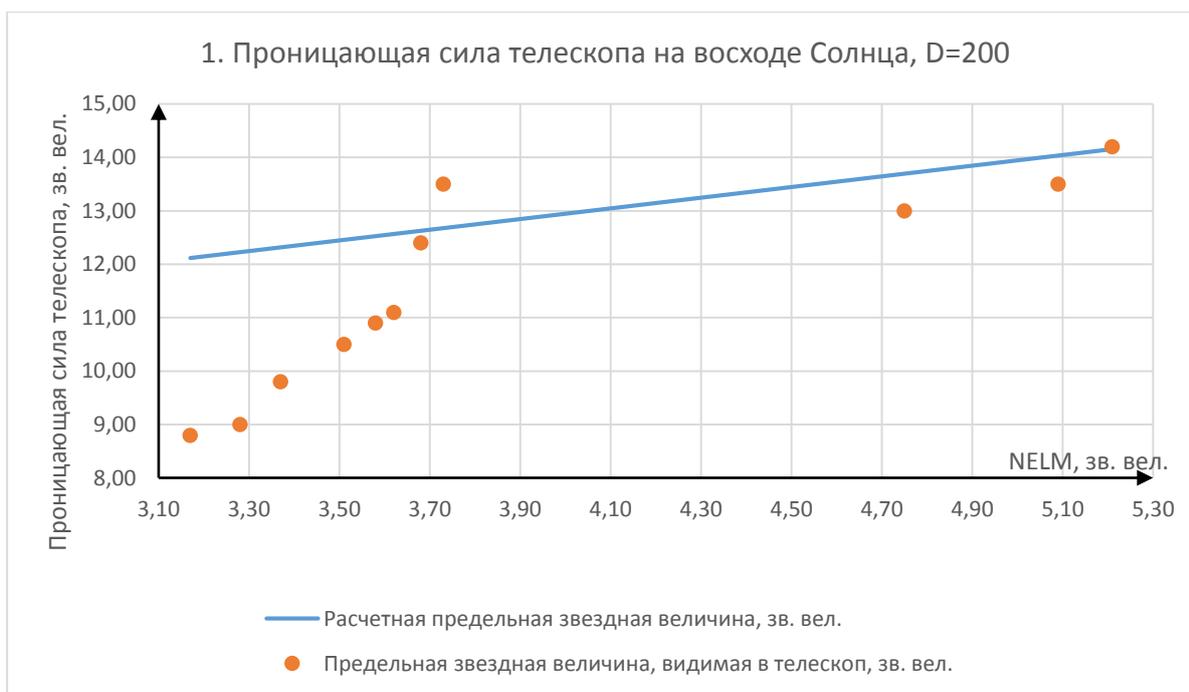


Рис.1. Измерение проницающей силы телескопа на восходе Солнца. D=200, Г=158, d=6 мм

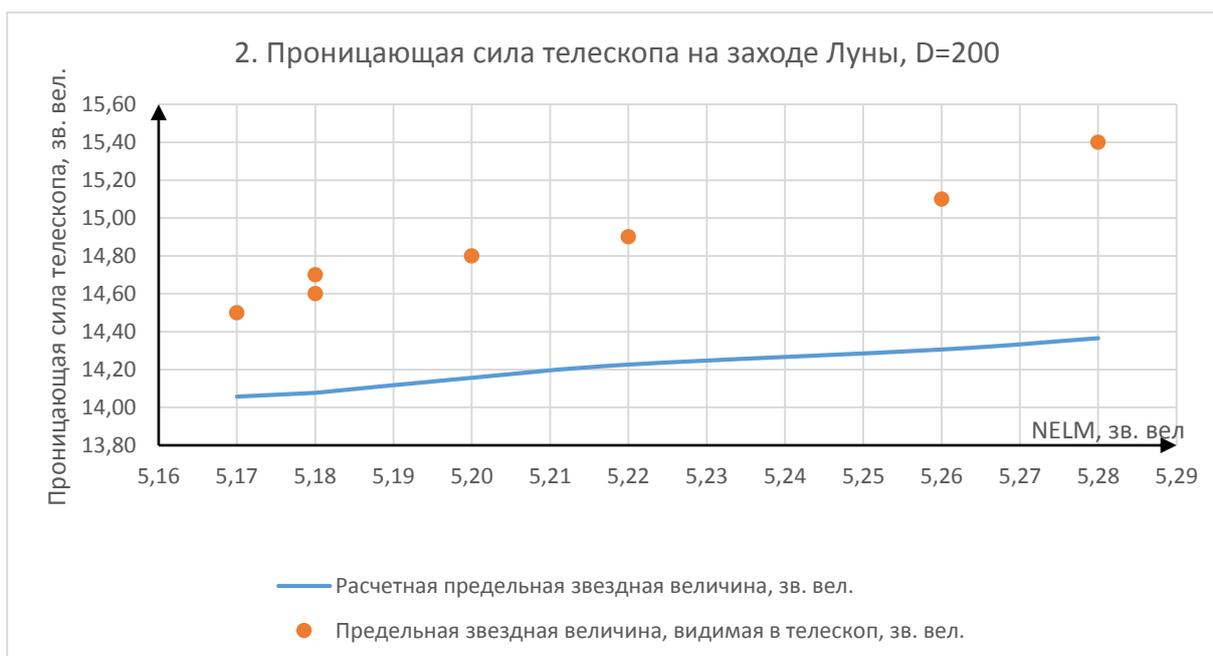


Рис.2. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Луны. D=200, Г=158, d=6 мм

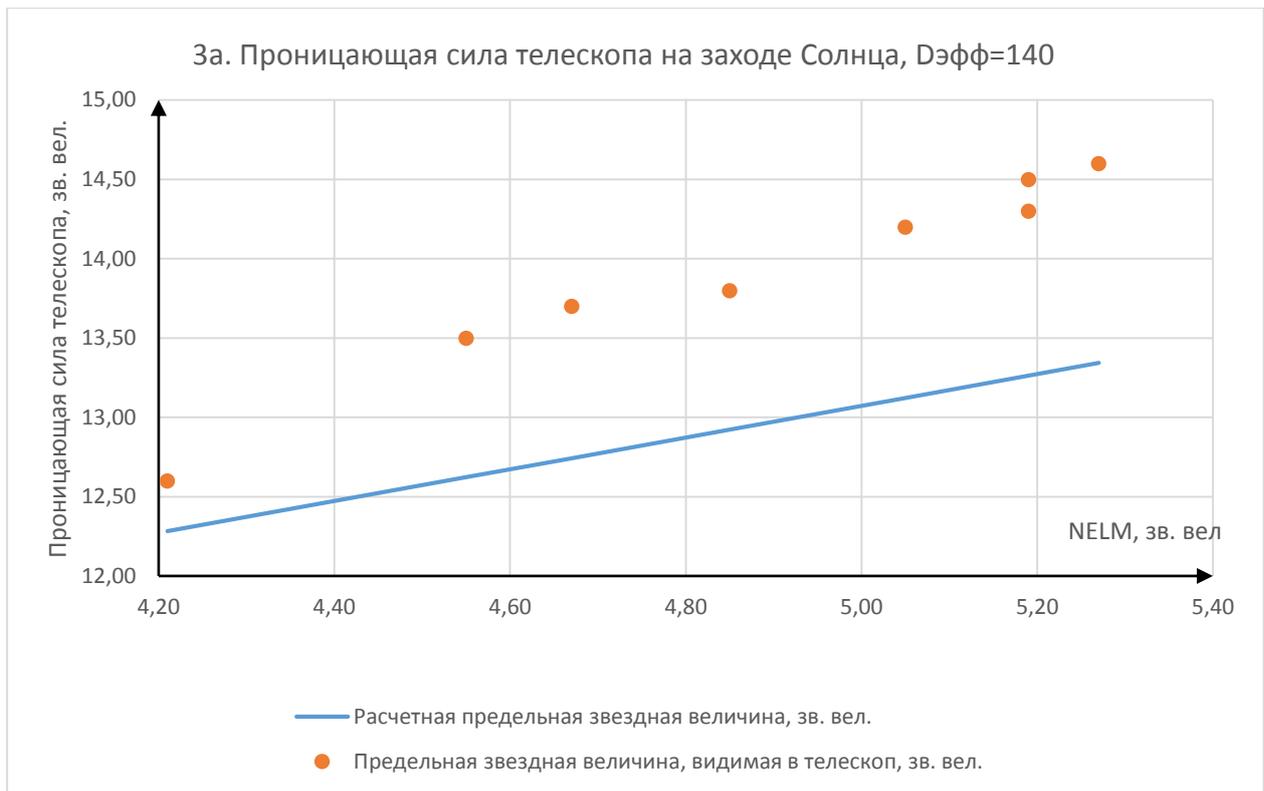


Рис.3. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Солнца. $D_{эфф}=140$, $\Gamma=100$, $d=6$ мм

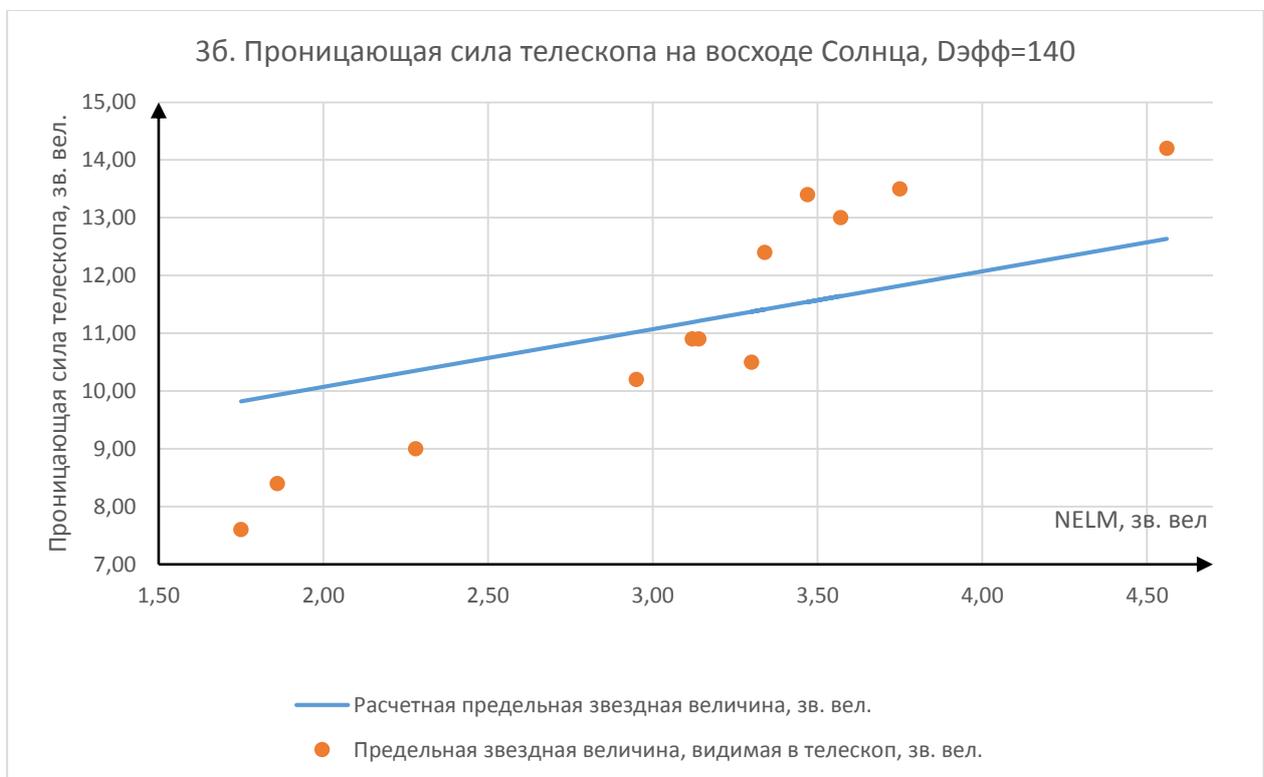


Рис.4. Измерение проницающей силы телескопа на восходе Солнца. $D_{эфф}=140$, $\Gamma=100$, $d=6$ мм

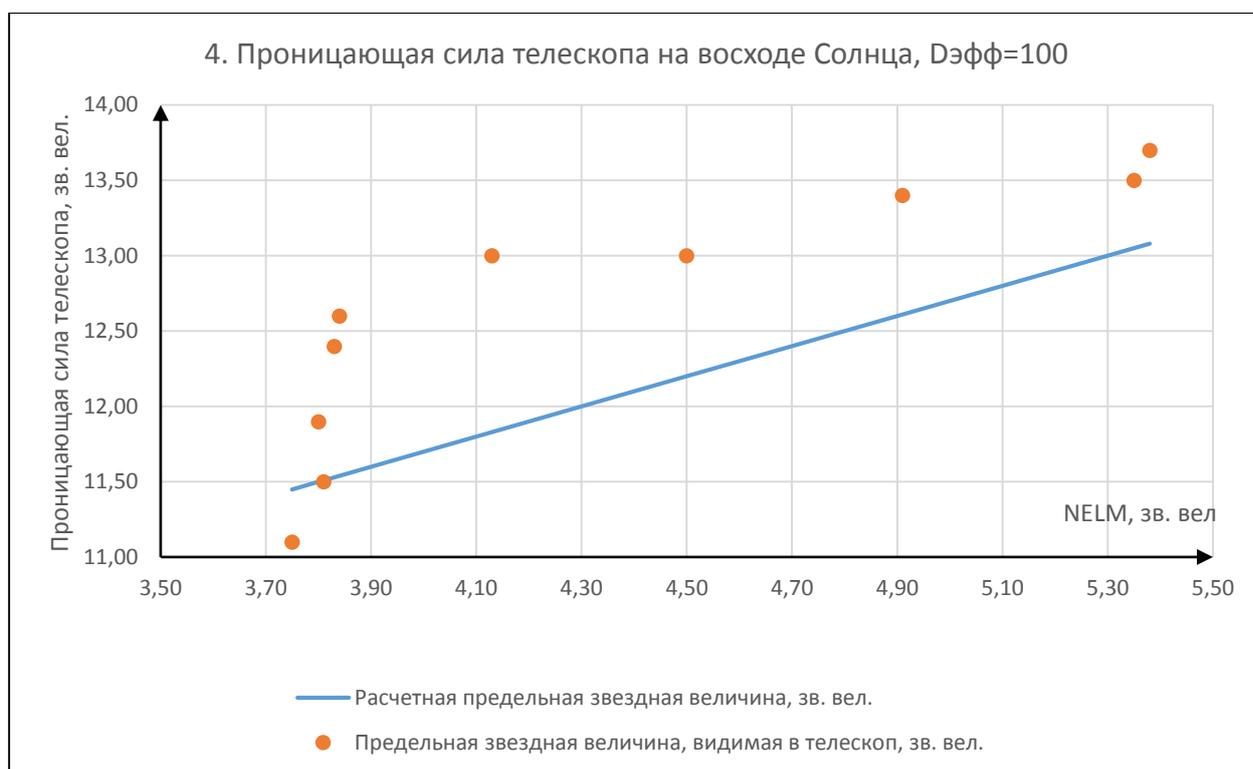


Рис.5. Измерение проницающей силы телескопа на заходе Солнца. $D_{эфф}=100$, $\Gamma=100$, $d=6$ мм

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 м. Для засветки хуже 16 м возможно оценочное использование формулы (1), в которой в качестве параметра m следует брать реальную (не расчетную⁵) 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 м. При такой засветке нижняя граница проницающей силы 200 мм рефлектора Ньютона будет составлять 12,5-13 м,

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 использованием разработанной методики проведены экспериментальные измерения проникающей 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 Мессье.

Все цели работы достигнуты, а задачи выполнены.

Литература и источники

1. Максutow 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=0BFFFFFFFTFFF>
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+/>

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

Случай идеальных условий $m = 6, d = 6$

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

Так, Максудов [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, $D/\Gamma = d = 6 \text{ мм}$:

$$M = m + 5 \lg(D/d) + 2,5 \lg k \quad (1).$$

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:

$$M = C + 2,5 \lg D + 2,5 \lg \Gamma \quad (2),$$

в которой параметр C 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 C берется (как правило) 2,1, при этом автору настоящей работы не удалось найти в литературе ни теоретический вывод значения $C = 2,1$, 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 M :

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

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

Пороговая яркость фона для телескопа и невооруженного глаза связаны соотношением:

$$B_0 = Bk \frac{(D/d)^2}{\Gamma^2} \quad (5)$$

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

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

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

$$\Delta M = -2,5 \lg d + 1,25 \lg k + 5 \lg D \quad (7),$$

откуда получается искомое выражение для M :

$$M = m - 2,5 \lg d + 1,25 \lg k + 5 \lg D \quad (8),$$

Которое для произвольного Γ (в пределах от равнозрачкового до разрешающего) преобразуется в (2), а для $\Gamma = D$ преобразуется в:

$$M = C + 5 \lg D \quad (9),$$

где коэффициент C :

$$C = m - 2,5 \lg d + 1,25 \lg k \quad (10).$$

Однако подстановка $m = 6$, $d = 6$ и $k = 0,51$ (для рефлекторов Ньютона отражение – 0,7, экранирование – 10%, окуляр – 90%, глаз – 90%) дает значение $C \approx 3,7$, 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 :

$$C = m - 5lgd + 2,5lgk \quad (11),$$

которое при подстановке $m = 6$, $d = 6$ и $k = 0,7$ дает значение $C \approx 1,4$. Стоит отметить, что если не учитывать светопотери, то формула (11) для $m = 6$, $d = 6$ даст значение $C \approx 2,1$, однако нет никаких оснований не учитывать светопотери. В то же время автор настоящей работы предполагает, что значение $C \approx 1,4$ 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 накладки – 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 $C \approx 1,4$ 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:

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

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])

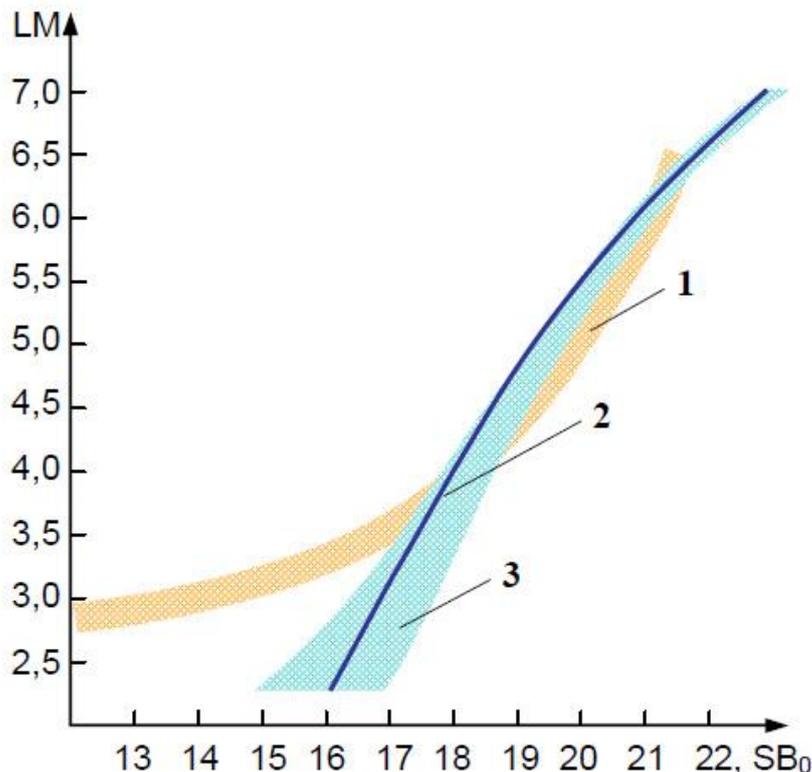


Рис. 6. График зависимости пред. звездной величины LM (в обозначениях настоящей работы – m) от яркости фона неба SB_0 (в обозначениях настоящей работы – S) в зените для невооружённого глаза. 3 – усреднённые данные наблюдателей с SQM, в том числе в условиях городской засветки, [6].

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 $S = 10 \text{ м/сек}^2$) 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 $S = 17 \text{ м/сек}^2$) соответствует диаметр зрачка от 5,5 до 6,5 мм. Учитывая, что уровень самой сильной городской засветки составляет порядка 18 м/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 $d = 6 \text{ мм}$, 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:

$$C = S - 19,6 \quad (13)$$

$$C = S - 19,2 \quad (14)$$

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:

$$M = S - 19,6 + 5lgD \quad (15)$$

$$M = S - 19,2 + 5lgD \quad (16)$$

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

Рецензия

На научно-исследовательскую работу ученика 10
класса МБОУ СОШ №56 г. Пензы им. Героя России

А.М. Самокутяева

Амирхана Палымбетова

«Проницающая сила телескопа в зависимости
от засветки фона неба»

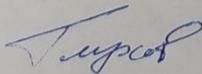
Рецензируемая работа посвящена определению зависимости предельных звездных величин, видимых в оптический любительский телескоп в зависимости от уровня засветки места наблюдения и др. факторов.

Работа носит исследовательский характер. Теоретический материал достаточно хорошо продуман, не содержит излишеств, красочно и насыщенно оформлен. В практической части приведены результаты работы, представленные наглядно. Приведена методика работы, она достаточно полная и содержательная, указаны цель и ход работы. В работе есть заключение и вывод, их содержание вполне соответствует предъявляемым к нему требованиям. Четко сформулирована цель, заострено внимание на постановке конкретных задач. Введение выглядит достаточно содержательным и емким. В результате четкого изложения цели работы в изложении основной части научно-исследовательской работы присутствует логичность, четкость, последовательность. В работе использовано большое количество дополнительных источников литературы.

Работа написана грамотным научным языком. Структура и оформление работы в целом соответствует предъявленным требованиям.

Автор работы демонстрирует достаточную физико-математическую подготовку, самостоятельность в поиске, отборе, систематизации и анализе материала.

П.В. Глухов



учитель физики МБОУ СОШ №56 г. Пензы

им. Героя России А.М. Самокутяева