



Управление образования города Пензы  
МКУ «Центр комплексного обслуживания и методологического  
обеспечения учреждений образования» г. Пензы  
МБОУ СОШ №56 г. Пензы им. Героя России А.М. Самокутяева

XXVI научно-практическая конференция  
школьников г. Пензы

«Я исследую мир»

## **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, 2021-2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ</b>	3
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	5
<b>2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	7
<b>3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	10
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	14
<b>ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ</b>	15
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	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,  $mm$

$\Gamma$  – 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  $35^\circ$ , 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)<sup>1</sup>. 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).

---

<sup>1</sup> 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 наблюдений<sup>2</sup> (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:

$D=200$ ,  $\Gamma=158$ ,  $d=6$ ,  $k=0,51$  (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:

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

$$M = m + 8,073 \quad (1б)$$

Для измерения 4 Таблицы 1 для расчетов использовались следующие параметры:

$D=100$ ,  $\Gamma=100$ ,  $d=6$ ,  $k=0,51$ , 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.

<sup>2</sup> 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 интегральная<sup>3</sup> 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.

---

<sup>3</sup> Без учета искусственной зимней засветки, составляющей в месте наблюдения около 20,5 т.

### 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  $-10^{\circ}$  до  $-16^{\circ}$  (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  $-10^{\circ}$  (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 хуже<sup>4</sup> 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,

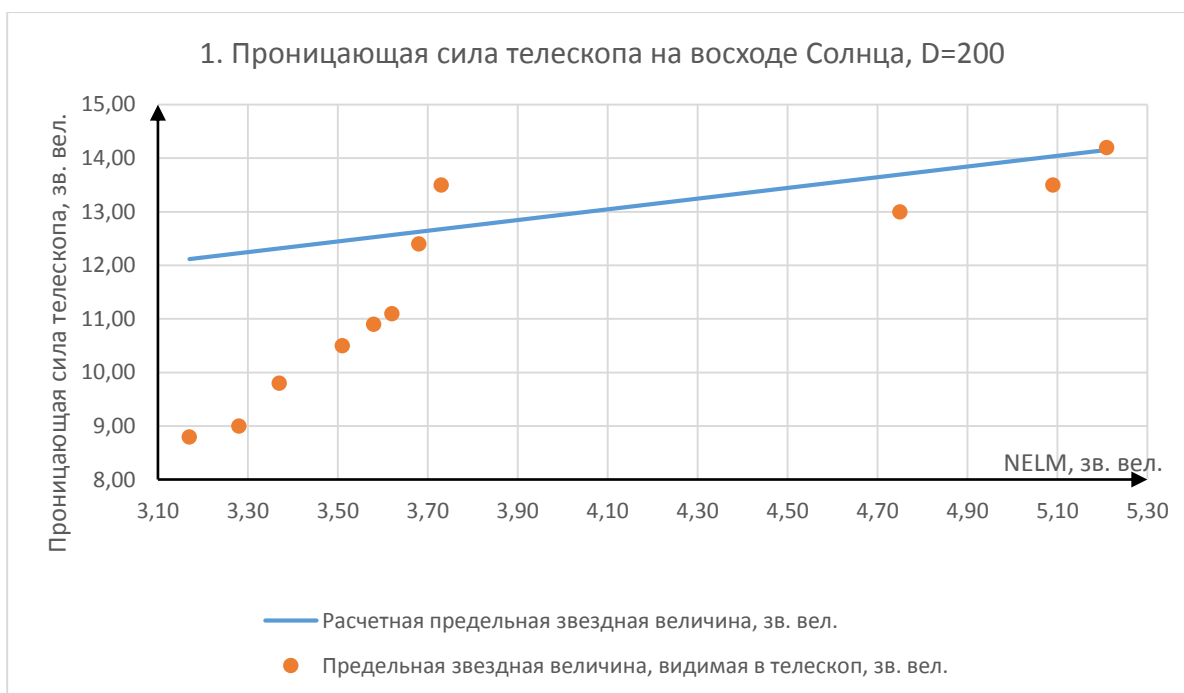
---

<sup>4</sup> 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.

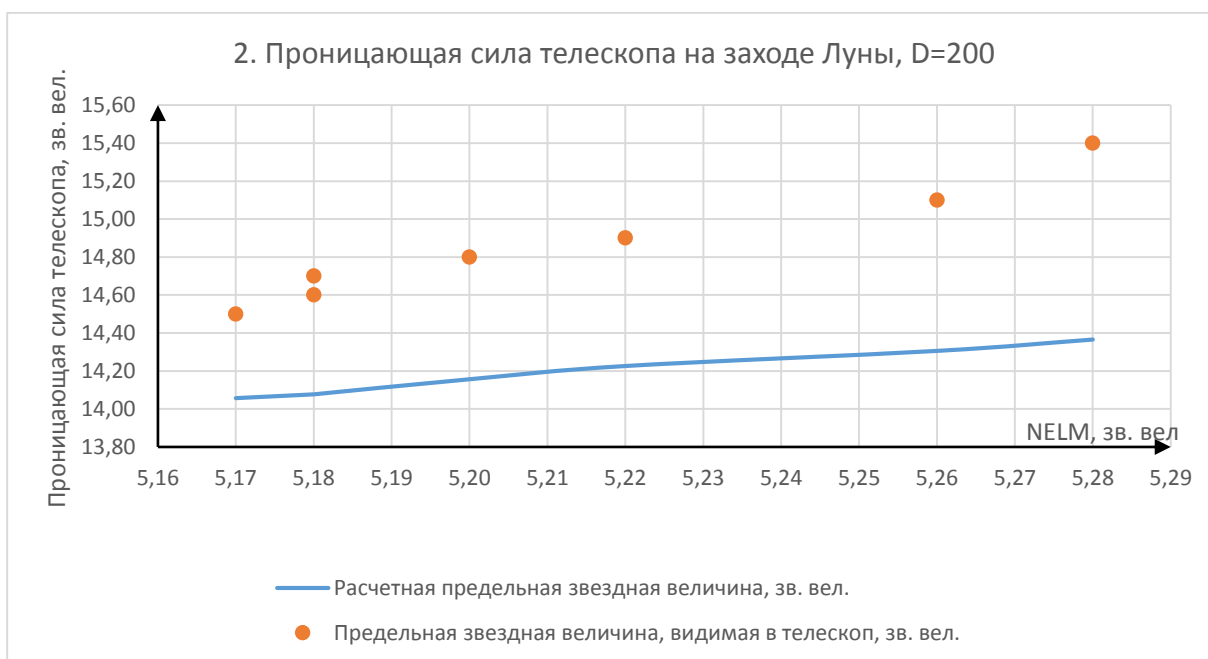
проницающей силы телескопа также окажется достаточно для наблюдения в городе наиболее ярких туманностей и галактик.

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

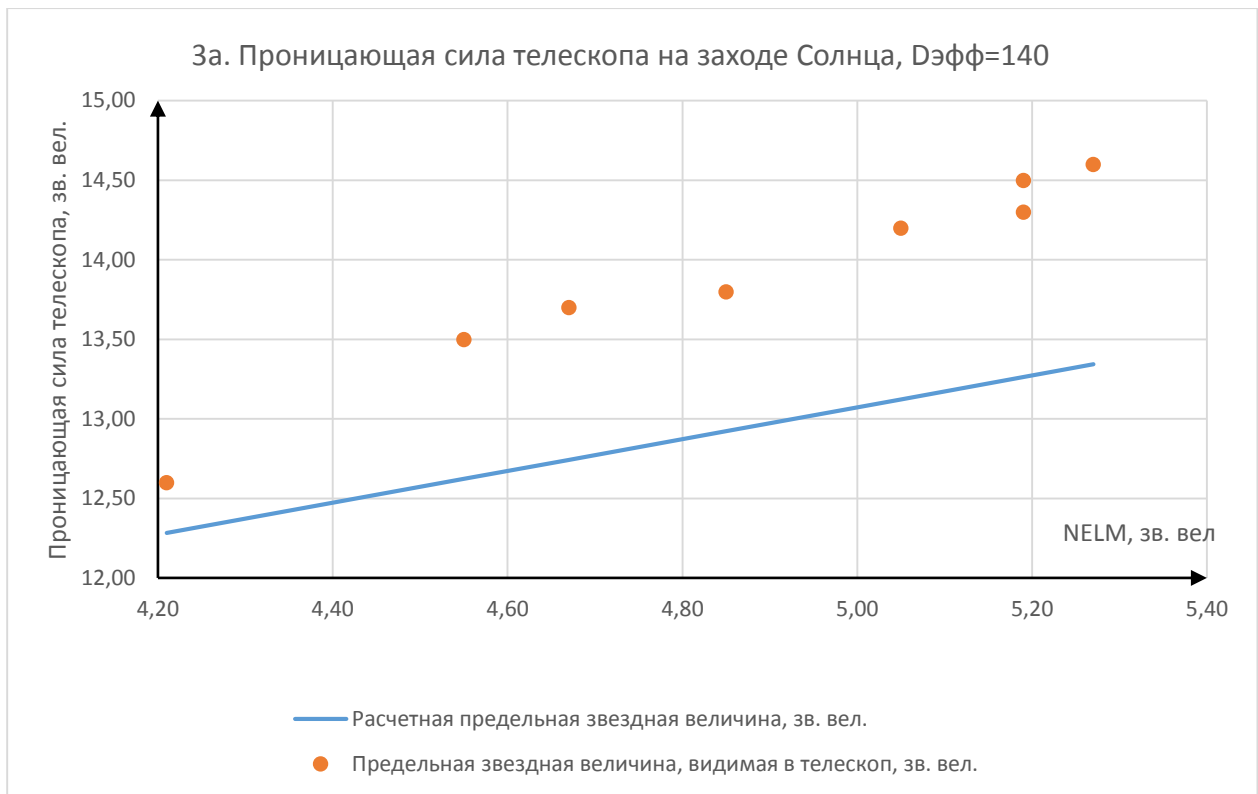
4. В момент проведения наблюдений звезда с координатами 5 ч 12 мин 00 с и  $+45^{\circ} 41' 33''$  имела блеск в пределах 12,5-13 m, в то время как в соответствии с картой данная звезда должна иметь блеск 13,5 m (ближайшие звезды 14,9 m и 15,5 m расположены слишком далеко и на использованных увеличениях 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.



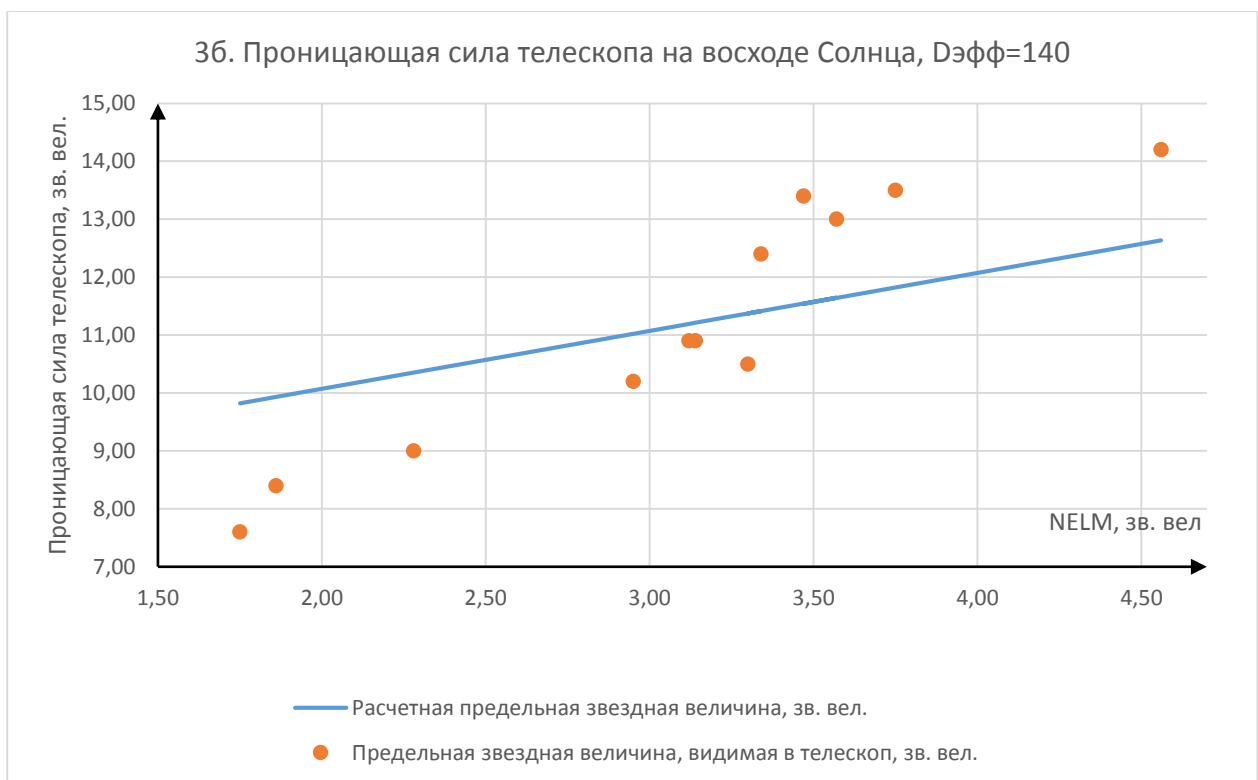
**Рис.1.** Измерение проницающей силы телескопа на восходе Солнца. D=200,  $\Gamma=158$ , d=6 мм



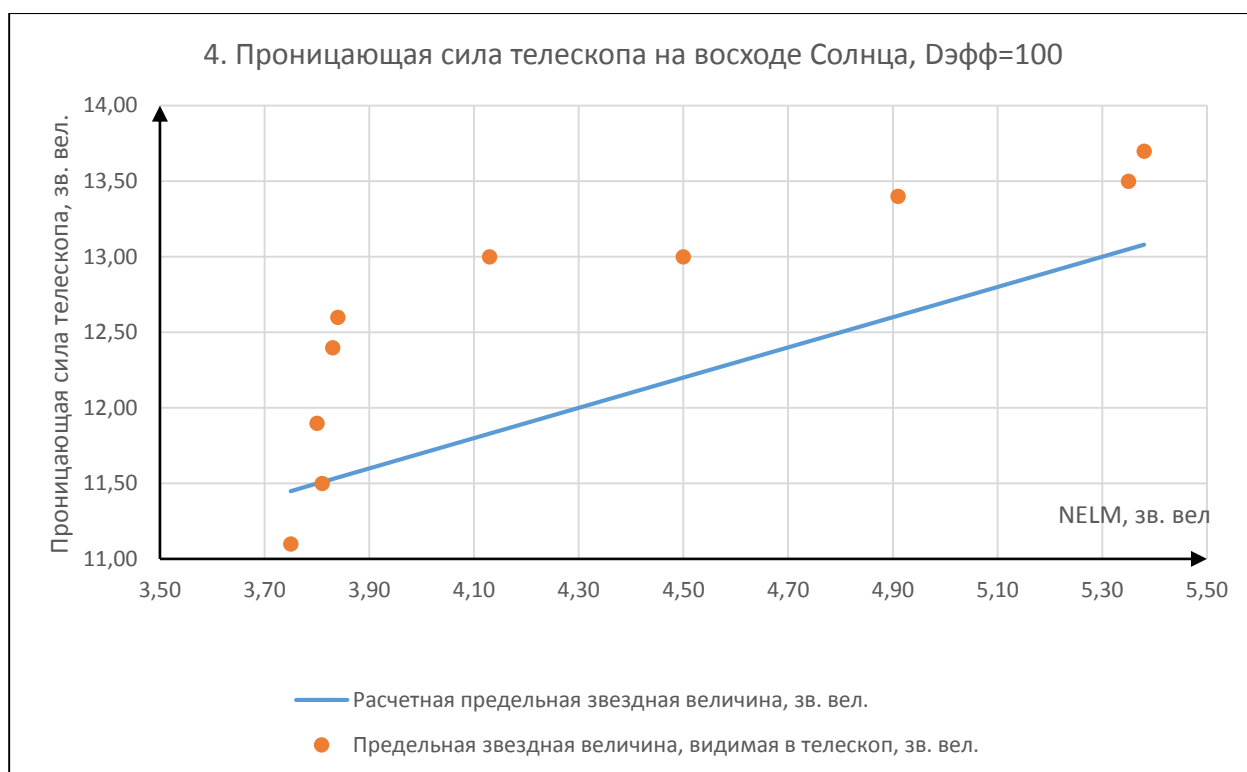
**Рис.2.** Измерение проницающей силы телескопа на заходе Луны. D=200,  $\Gamma=158$ , d=6 мм



**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 расчетную<sup>5</sup>) 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,

<sup>5</sup> 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  $22 \text{ м/сек}^2$  (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  $\Gamma$  (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])

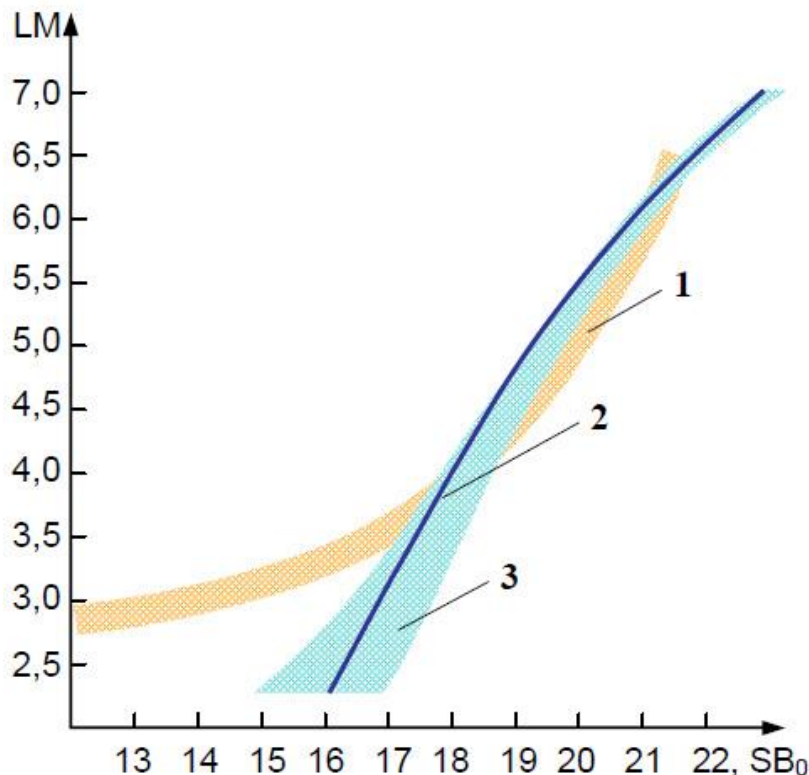


Рис. 6. График зависимости пред. звездной величины LM (в обозначениях настоящей работы – m) от яркости фона неба  $SB_0$  (в обозначениях настоящей работы – S) в зените для невооружённого глаза. 3 – усреднённые данные наблюдателей с SQM, в том числе в условиях городской засветки, [6].

Теперь рассмотрим зависимость диаметра зрачка глаза от засветки  $d = d(S)$ . В соответствии с данными [7] нижней границе дневного зрения (при засветке  $10 \text{ кд/м}^2$ , 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  $10^{-2} \text{ кд/м}^2$ , 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  $18 \text{ м/сек}^2$ , 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.