

Т. А. Семенихин ¹, М. В. Корнилов ², М. В. Пружинская ²

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет космических исследований,

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга

Контактная информация: ofmafowo@gmail.com

Введение

Сверхъяркие сверхновые (СН) — это объекты, чья абсолютная звездная величина в максимуме блеска $M < -21^m$, а полная излучаемая энергия $E > 10^{51}$ эрг [2]. Таким образом, сверхъяркие СН как минимум в 10 раз ярче, чем типичные сверхновые типа Ia, используемые в качестве индикаторов космологических расстояний [3, 4].

Сверхъяркие СН разделяют на три типа. К I типу относят объекты, в спектрах которых отсутствует водород, а ко II типу — объекты, в спектрах которых линии водорода наблюдаются. К третьему типу (R тип, сокращение от англ. radioactive) относят сверхновые, которые имеют продолжительную медленно спадающую кривую блеска, форма которой, по всей видимости, обусловлена радиоактивным распадом кобальта [2]. На рисунке 1 приведены кривые блеска для сверхъярких сверхновых в сравнении с обычными сверхновыми.

Цель работы состоит в получении болометрических кривых блеска сверхъярких сверхновых, используя данные Открытого каталога сверхновых звезд (ОКС) и векторные Гауссовы процессы.

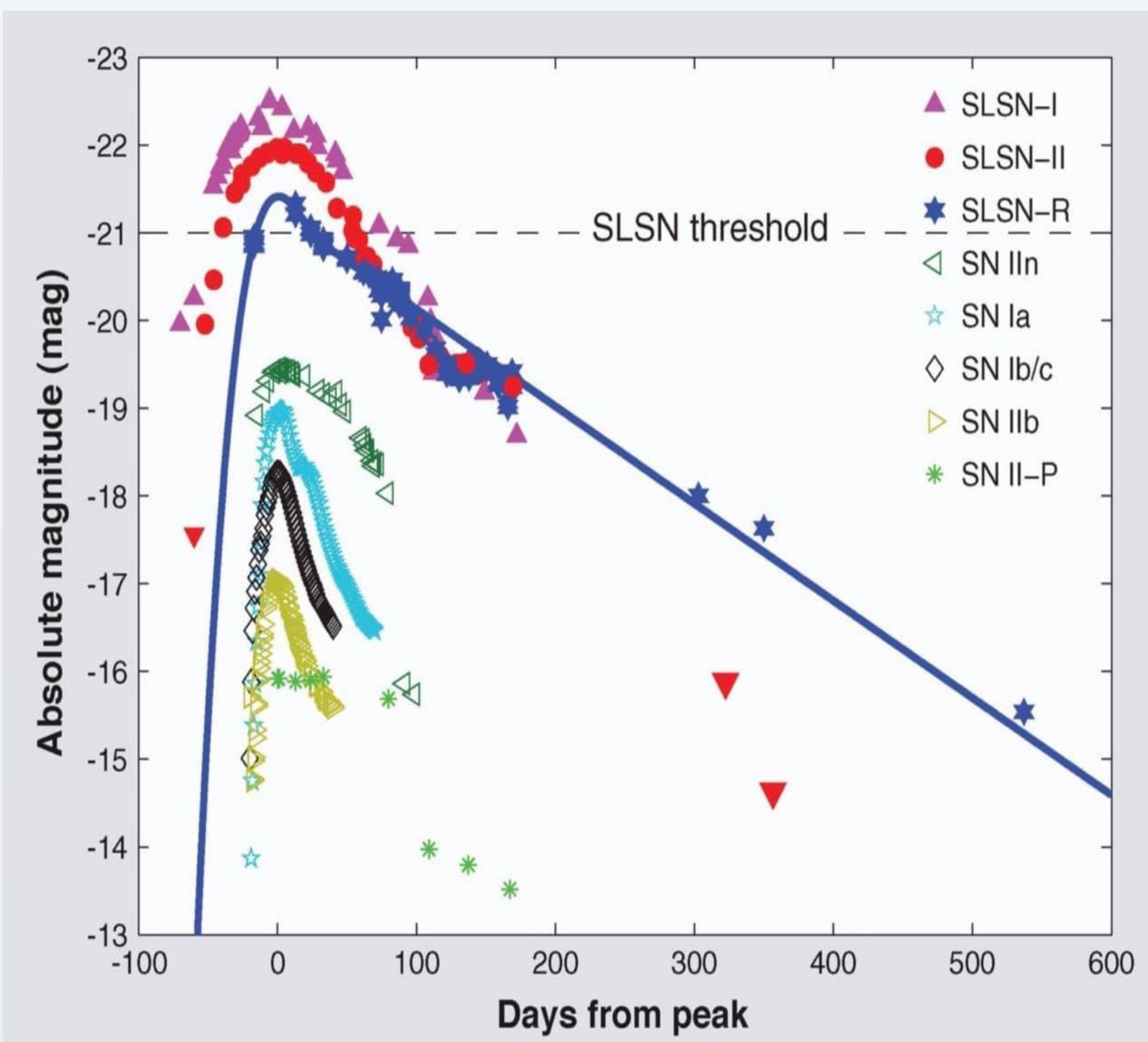


Рис 1. Кривые блеска для сверхновых разных типов [1]

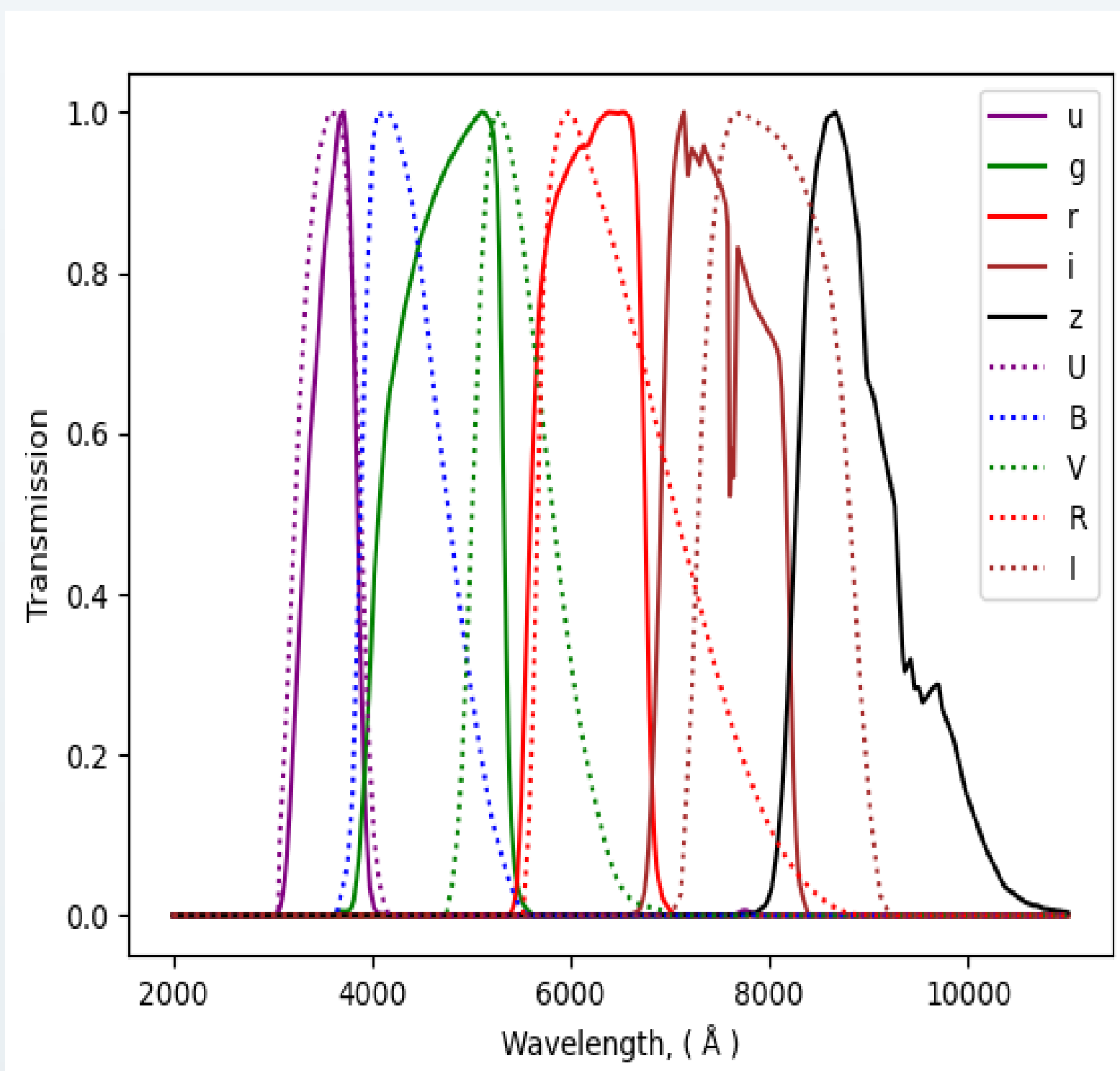


Рис 2. Полосы пропускания ugriz и UVRI

Методы

Представленные в каталоге ОКС [5] многоцветные кривые блеска неоднородны по времени. Для получения (квази) болометрической кривой блеска необходимо просуммировать потоки, измеренные в разных полосах. Поэтому имеющиеся кривые блеска нужно аппроксимировать. В данной работе это было сделано с помощью векторных Гауссовых процессов (ГП) [6].

Формирование выборки из ОКС

Для подтверждения принадлежности объекта к классу сверхъярких сверхновых необходимо наличие спектра. В ОКС всего 224 сверхъярких сверхновых, из них только у 117-ти есть данные об их спектре. Далее необходимо отобрать те объекты, у которых данные фотометрии представлены в нужных нам полосах пропускания.

В этой работе рассматривались три системы фильтров: ugriz, u'g'r'i'z' и UVRI. На рисунке 2 представлены кривые пропускания фильтров ugriz и UVRI. Видно, что обе системы покрывают примерно одну и ту же часть спектра.

Из ОКС отбирались те объекты, для которых есть данные фотометрии как минимум в трех полосах пропускания и в каждой полосе не менее 3 точек. Таким образом, в выборке осталось 27 объектов. Они приведены в таблице, у каждой сверхновой указан тип, координаты, красное смещение и полосы пропускания, в которых имеются данные фотометрии.

Name	Type	ra	dec	redshift	bands
SN2015bn	SLSN I-R	11:33:41.57	+00:43:32.2	0.114	u',g',r',i',z',U,B,V,R,I
PTF12dam	SLSN I-R	14:24:46.20	+46:13:48.3	0.107	u,g,r,z,i,U,B,V
SN2015L	TDE	22:02:15.45	-61:39:34.6	0.233	U,B,V
SN2016eay	SLSN I-R	12:02:51.71	+44:15:27.4	0.101	g,r,i,U,B,V,R,I
SN2017faf	SN II	17:34:39.98	+26:18:22.0	0.029	i,z,B,V,R,I
SN2010gx	SLSN I	11:25:46.71	-08:49:41.4	0.230	g,r,i,z,u',g',r',i',z',U,B,V,R
PTF09cnd	SLSN I-R	16:12:08.94	+51:29:16.1	0.258	u,g,r,i,U,B,R
SN2011kg	SLSN I	01:39:45.51	+29:55:27.0	0.192	u,g,r,i,z,U,B
SN2008es	SLSN II	11:56:49.13	+54:27:25.7	0.202	U,B,V,R,I
SN2011ke	SLSN I	13:50:57.77	+26:16:42.8	0.143	u,g,r,i,z,U,B,V
LSQ15abl	SLSN II	09:40:29.50	-04:11:32.3	0.087	U,B,V
PTF12mxx	SLSN I	22:30:16.73	+27:58:22.0	0.330	u,g,r,i,z,U,B,V
PS1-10ky	SLSN I	22:13:37.85	+01:14:23.6	0.956	g,r,i,z
iPTF13ajg	SLSN I-R	16:39:03.95	+37:01:38.4	0.740	u,g,r,i,z,B,R
SN2018bsz	SLSN I	16:09:39.10	-32:03:45.7	0.027	u,g,r,i,z,U,B,V
PS1-14bj	SLSN I-R	10:12:08.43	+03:39:19.0	0.522	g,r,i,z
PTF12gty	SLSN I	16:01:15.23	+21:23:17.4	0.177	g,r,i
SN2013hy	SLSN I-R	02:42:32.82	-01:21:30.1	0.663	g,r,i,z
LSQ14mo	SLSN I	10:22:41.53	-16:55:14.4	0.253	u,g,r,i,U,R
PS1-10bzj	SLSN I	03:31:39.83	-27:47:42.2	0.650	g,r,i,z
PS1-10awh	SLSN I-R	22:14:29.83	-00:04:03.6	0.908	g,r,i,z
PTF10aag	SLSN I	09:39:56.92	+21:43:17.1	0.206	u,g,r,i,U
PTF10bfz	SLSN I	12:54:41.27	+15:24:17.0	0.170	g,r,i,B
SNLS-06D4eu	SLSN I	22:15:54.29	-18:10:45.6	1.588	g,r,i,z
SN2011kf	SLSN I	14:36:57.53	+16:30:56.6	0.245	g,r,i,z
SN2012il	SLSN I	09:46:12.91	+19:50:28.7	0.175	g,r,i,z
DES15E2mlf	SLSN I	00:41:33.40	-43:27:17.2	1.861	g,r,i,z

Выборка сверхъярких СН из ОКС

Ссылки

- [1] A. Gal-Yam. «Luminous Supernovae». в: Science 337.6097 (август 2012), с. 927—932. issn: 1095-9203. doi: 10.1126/science.1203601. url: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1203601>.
- [2] Takashi J. Moriya, Elena I. Sorokina и Roger A. Chevalier. «Superluminous Supernovae». в: Space Science Reviews 214.2 (март 2018). issn: 1572-9672. doi:10.1007/s11214-018-0493-6. url: <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-018-0493-6>.
- [3] S. Perlmutter и др. «Measurements of and from 42 High-Redshift Supernovae». в: The Astrophysical Journal 517.2 (июнь 1999), с. 565—586. issn: 1538-4357. doi: 10.1086/307221. url: <http://dx.doi.org/10.1086/307221>.
- [4] Adam G. Riess и др. «Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant». в: 116.3 (сентябрь 1998), с. 1009—1038. doi: 10.1086/300499. arXiv: astro-ph/9805201 [astro-ph].
- [5] <https://sne.space/>
- [6] <https://gp.snad.space/>
- [7] <https://github.com/semtim/SLSN-and-GP>

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта № 21-52-15024. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета "Фундаментальные и прикладные исследования космоса"

Гауссовы процессы

Гауссов процесс — это совокупность случайных величин, индексированных временем, такая что любой конечный набор этих случайных величин имеет многомерное нормальное распределение, то есть любая конечная линейная комбинация из них нормально распределена. Распределение гауссова процесса – это совместное распределение всех его случайных величин и, в силу чего, является распределением функций с непрерывной областью определения.

Ковариационные функции (ядра), которые использовались для аппроксимации кривых блеска:

- Radial-basis function (RBF) kernel $K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{d(x_i, x_j)^2}{2l^2}\right)$
- Matérn kernel (с параметром nu = 1.5) $K(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{l}d(x_i, x_j)\right) * \exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{l}d(x_i, x_j)\right)$
- Rational quadratic kernel $K(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{d(x_i, x_j)^2}{2\alpha l^2}\right)^{-\alpha}$
- White kernel $K(x_i, x_j) = \begin{cases} \text{noise level}, & \text{if } x_i = x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases}$

Где d() — евклидово расстояние, а параметры l и α подбираются методом наибольшего правдоподобия.

Аппроксимация кривых блеска

На начальном этапе работы рассматривались две упрощенные задачи. В первом случае кривые блеска аппроксимируются с помощью обычных Гауссовых процессов только в одной фотометрической полосе, а во втором – в трёх, при помощи векторных ГП. Для обоих случаев рассматривалось 100 кривых блеска, взятых из ОКС.

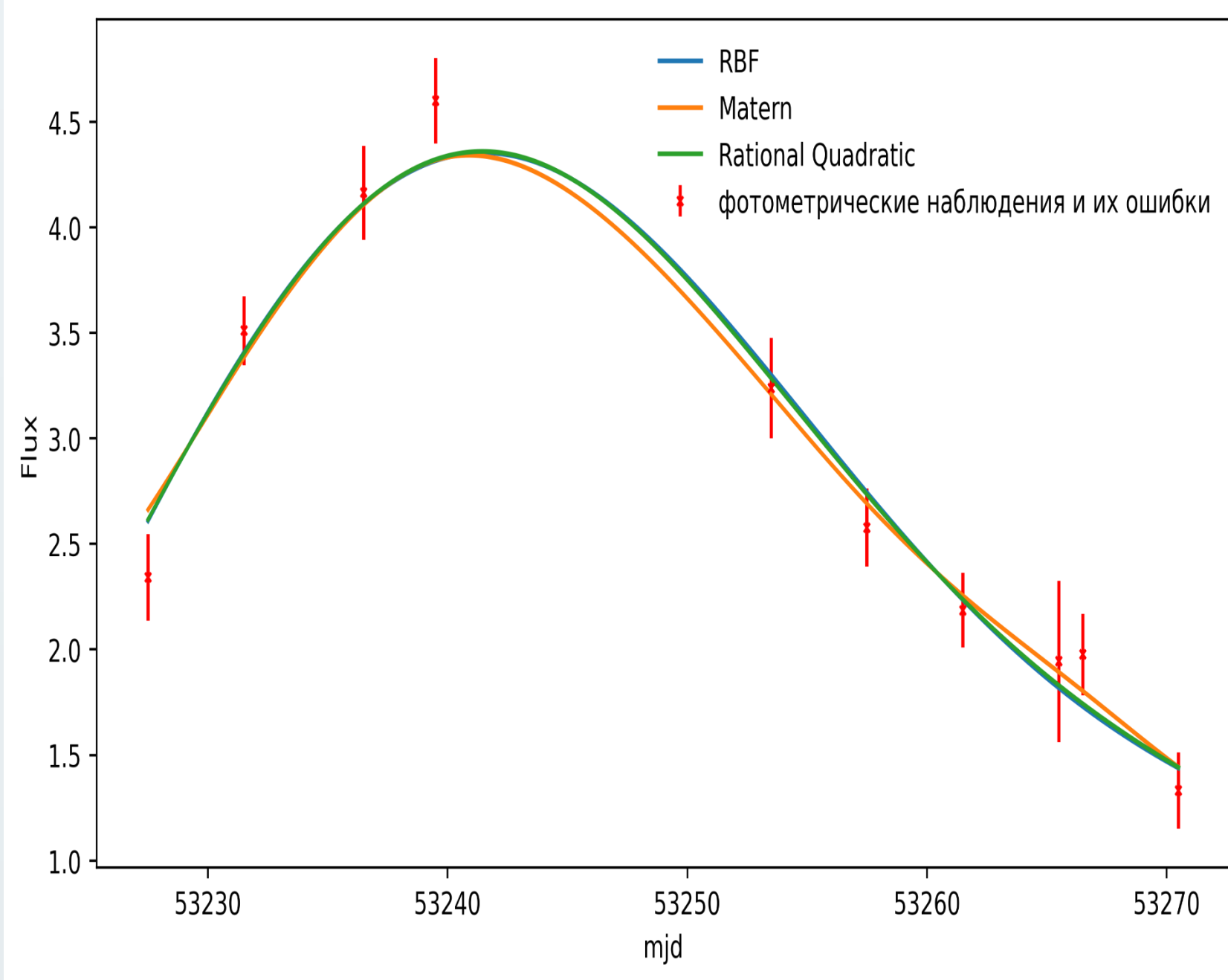


Рис. 3. Кривая блеска SNLS-04D1de: сплошными линиями показаны результаты аппроксимации Гауссовыми процессами

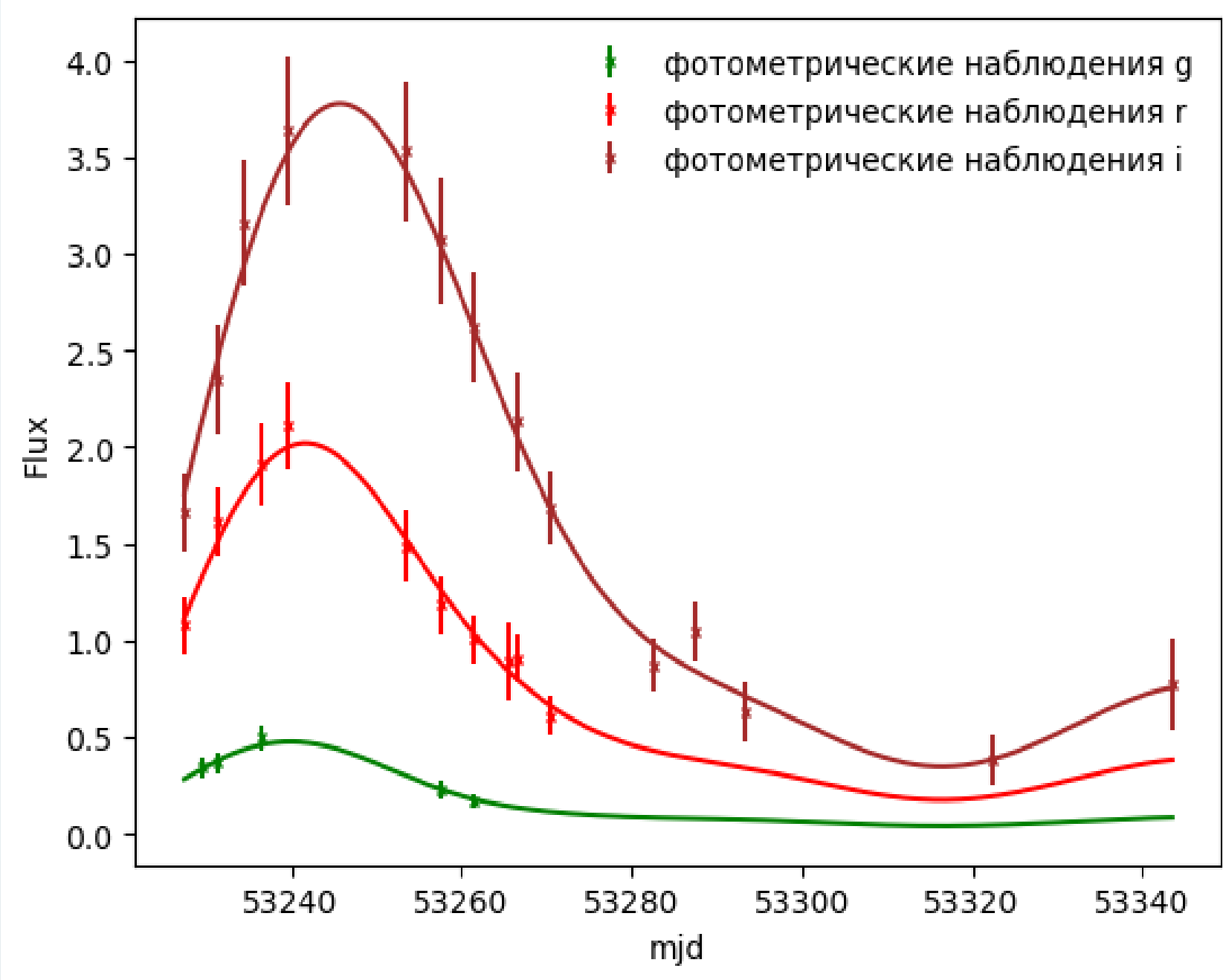


Рис. 4. Кривая блеска SNLS-04D1de: сплошными линиями показан результат аппроксимации векторным Гауссовым процессом

Построение болометрических кривых блеска

Для получения болометрических кривых блеска использовался метод, который предполагает, что в каждый момент времени спектр сверхновой может быть описан спектром черного тела с определенной температурой. При помощи аппроксимированных нами многоцветных кривых блеска, можно достаточно точно оценить температуру черного тела в данный момент времени и рассчитать болометрическую кривую блеска.

Из выборки были отобраны три объекта разных типов – это SN2011ke (SLSN I), PS1-14bj (SLSN I-R) и SN2008es (SLSN II). Полученные болометрические кривые представлены на графике 5. Также для того, чтобы объяснить болометрические кривые блеска исследуемых сверхновых, на графике приведена кривая, обусловленная радиоактивными распадами ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$).

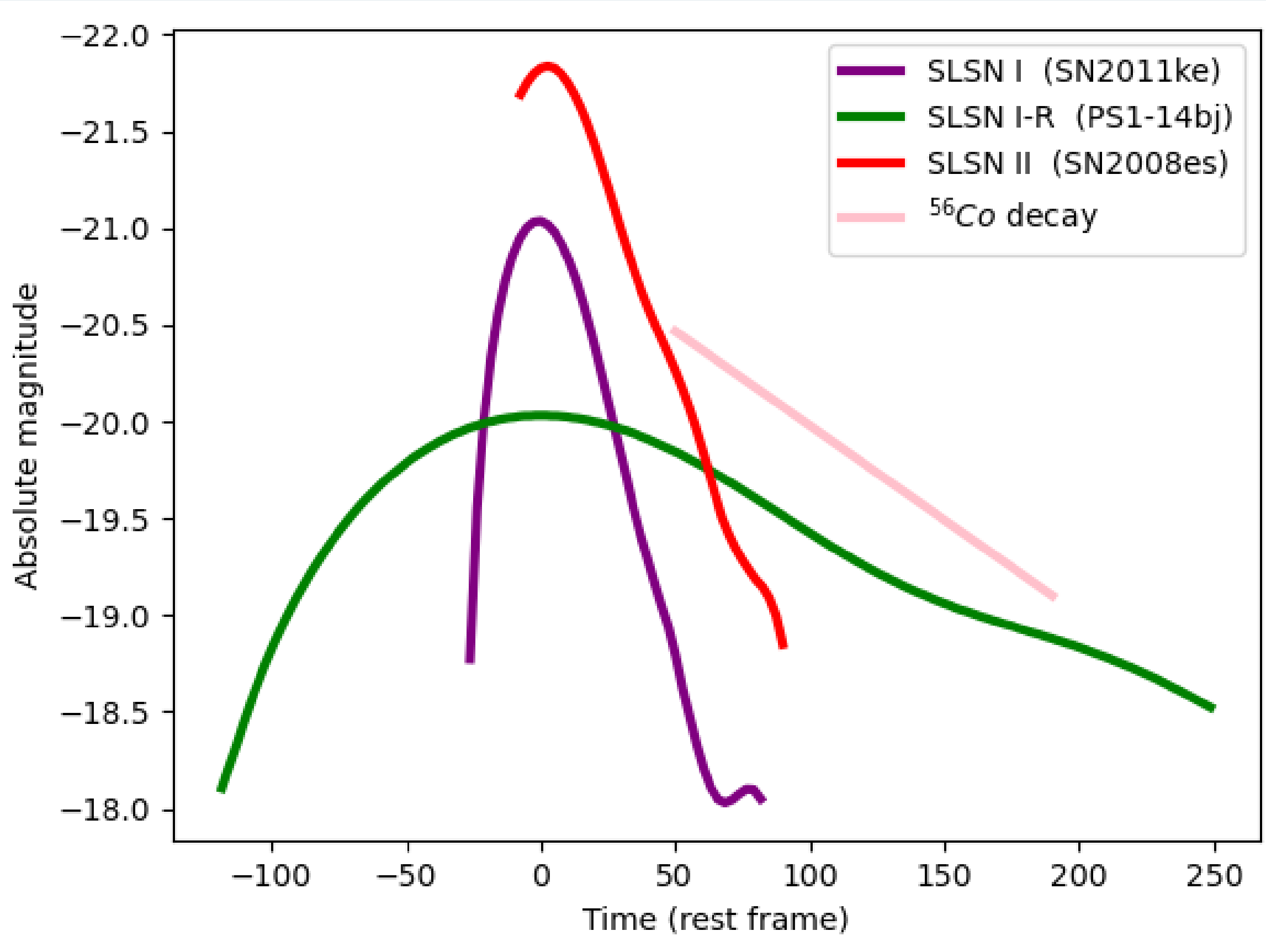


Рис. 5. Болометрические кривые блеска для сверхъярких сверхновых разных типов

Вывод

Была решена задача аппроксимации многоцветных кривых блеска объектов из ОКС, и сформирована выборка сверхъярких СН, подходящих под условия нашей задачи. Все объекты, попавшие в выборку, были аппроксимированы векторными ГП [7]. Среди аппроксимированных объектов были отобраны три сверхъярких СН разных типов. Для них были построены и приведены к одной системе болометрические кривые блеска.

В дальнейшем планируется получить болометрические кривые блеска для всех оставшихся объектов из сформированной выборки, а также, используя теоретические и аналитические модели, извлечь из болометрических кривых блеска информацию о параметрах предсверхновых и параметрах взрыва, что поможет лучше понять их астрофизическую природу.