

Всероссийская конференция
"Современная звёздная астрономия-2019"
САО РАН, 6-11 октября 2019 г.,
Нижний Архыз, КЧР

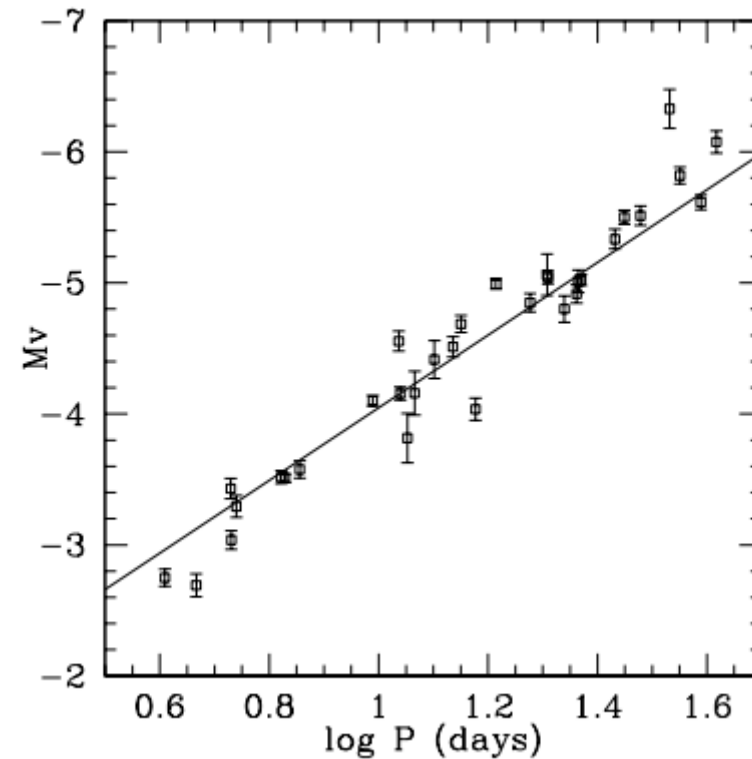
САО РАН
ИНАСАН
ГАИШ МГУ

Построение зависимости "период-светимость"
цефеид по мультифазным измерениям
эффективных температур и данным GAIA DR2

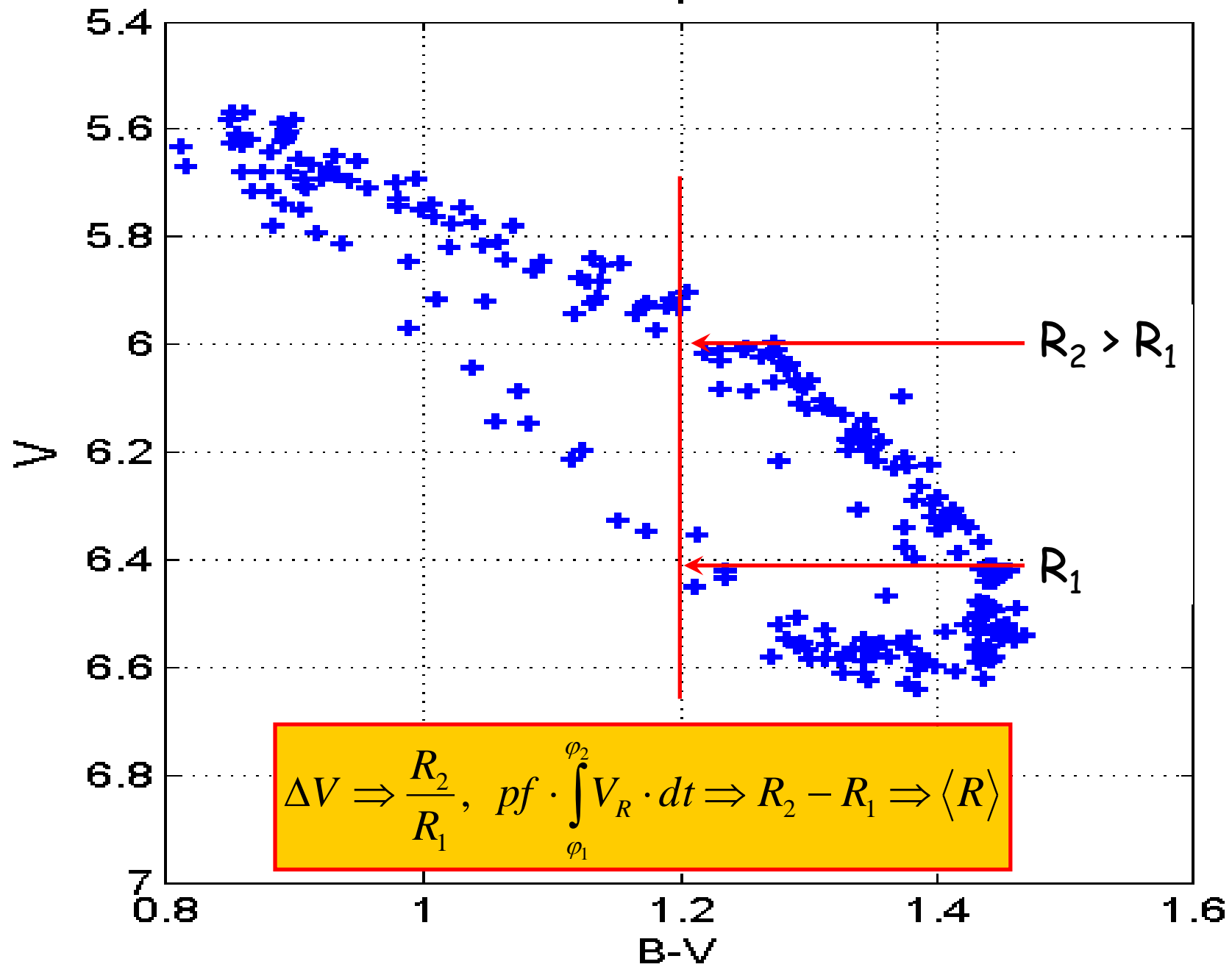
Я.А. Лазовик, А.С. Расторгуев, М.В. Заболотских, Н.А. Горыня
(физический факультет МГУ, ГАИШ МГУ, ИНАСАН)

Калибровка зависимости "период-светимость"

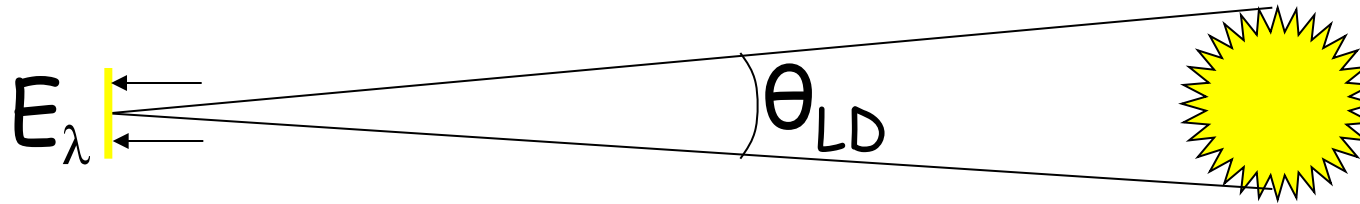
1. Тригонометрические параллаксы
2. Цефеиды в рассеянных звездных скоплениях и молодых звёздных группировках
3. **Метод Бааде-Беккера-Весселинка:**
 - Метод поверхностной яркости (IRSB)
 - Метод максимального правдоподобия (BBWB - Л. Балона)
4. Калибровка цефеидных шкал расстояний по данным о БМО и ММО



T Mon loop on CMD



Метод поверхностной яркости (SB)



- θ_{LD} “потемнённый к краю лимба” (Limb Darkened, т.е. видимый) угловой диаметр
- Освещённость $E_{\lambda} \sim \Phi_{\lambda} \cdot \theta_{LD}^2$, где Φ_{λ} - поверхностная яркость (не зависящая от расстояния !)
- $F_{\lambda} = -2.5 \lg \Phi_{\lambda}$ - “параметр поверхностной яркости”
- Здесь видимая величина $m_{\lambda} \sim -2.5 \lg E_{\lambda}$
исправлена за поглощение света ! Нужно заранее знать избыток цвета !

• Метод поверхностной яркости (SB):

• $\lg \theta_{LD} \sim -0.2 \cdot m_{\lambda}^0 - 2 \cdot F_{\lambda} + C$

• $F_{\lambda} \approx a \cdot CI_{\lambda}^0 + b$ - цветовая калибровка



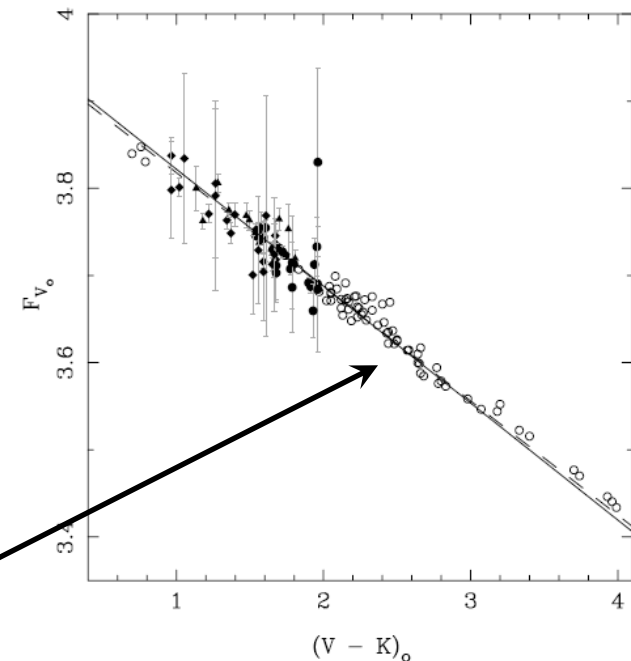
$$\lg \theta_{LD} = \lg [2 \cdot (\langle R \rangle + \Delta R) / D] \approx -0.2 \cdot m_{\lambda}^0 - 2a \cdot CI_{\lambda}^0 + A$$

D - расстояние

Кривые блеска и цвета

Пример:

F_V - линейная калибровка параметра поверхностной яркости по нормальному цвету $(V-K)_0$



Метод максимального правдоподобия (BBWB)

$$5. \quad R(\varphi) - R_0 = - \text{pf} \int_{\varphi_0}^{\varphi} (V_r(\varphi) - V_\gamma) \times (P/2\pi) d\varphi$$

pf – проекционный фактор (считаем зависящим от периода: Nardetto, 2007):

$$\text{pf} = 1.376 - 0.064 \cdot \lg(P)$$

V_γ – системная лучевая скорость цефеиды

Оригинальная форма метода Л.Балона (1977)

$$6. \quad m = A \times CI - 5 \times \lg(R(\varphi)) + C$$

Решая это уравнение, находим неизвестные постоянные: A , C и $\langle R \rangle$
(константы в неявном виде содержат $E(B-V)$)

Модифицированный метод максимального правдоподобия (VBW)

1. $m = Y - \Psi - 5 \times \lg \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)$

2. $Y = (m - M)_{\text{app}} + M_{\text{bol}\odot} + 10 \times \lg \left(T_{\text{eff}\odot} \right)$

3. $\Psi(CI_0) = BC + 10 \times \lg(T_{\text{eff}})$

4. $\Psi(CI_0) = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k \cdot CI_0^k$

- Основа модифицированного метода моделирования кривой блеска (Расторгуев и др., 2011, 2013) заключается в представлении болометрической поправки BC, логарифма эффективной температуры $\lg(T_{\text{eff}})$, а значит, и функции Ψ в виде **(нелинейного !)** степенного ряда по нормальному цвету CI_0 (часто со включением членов с $\lg g$ и $[Fe/H]$).

- Отметим идентичность методов поверхностной яркости и максимального правдоподобия (общее физическое основание):
- параметр поверхностной яркости $F_\lambda = 0.1 \cdot \Psi(CI_0) = \lg(T_{\text{eff}}) + 0.1 \cdot BC(\lambda)$

$$5 \cdot \lg \Theta_{LD} = 5 \cdot \lg \frac{\langle R \rangle + \Delta R}{D} = C - V_0 - \Psi(CI_0)$$

- или

$$V = -5 \cdot \lg(\langle R \rangle + \Delta R) - \Psi(CI_0) + C + \lg D + A_V$$

- Сравним с выражением, используемым Расторгуевым и др.:

$$V = -5 \cdot \lg(\langle R \rangle + \Delta R) - \Psi(CI_0) + Y,$$

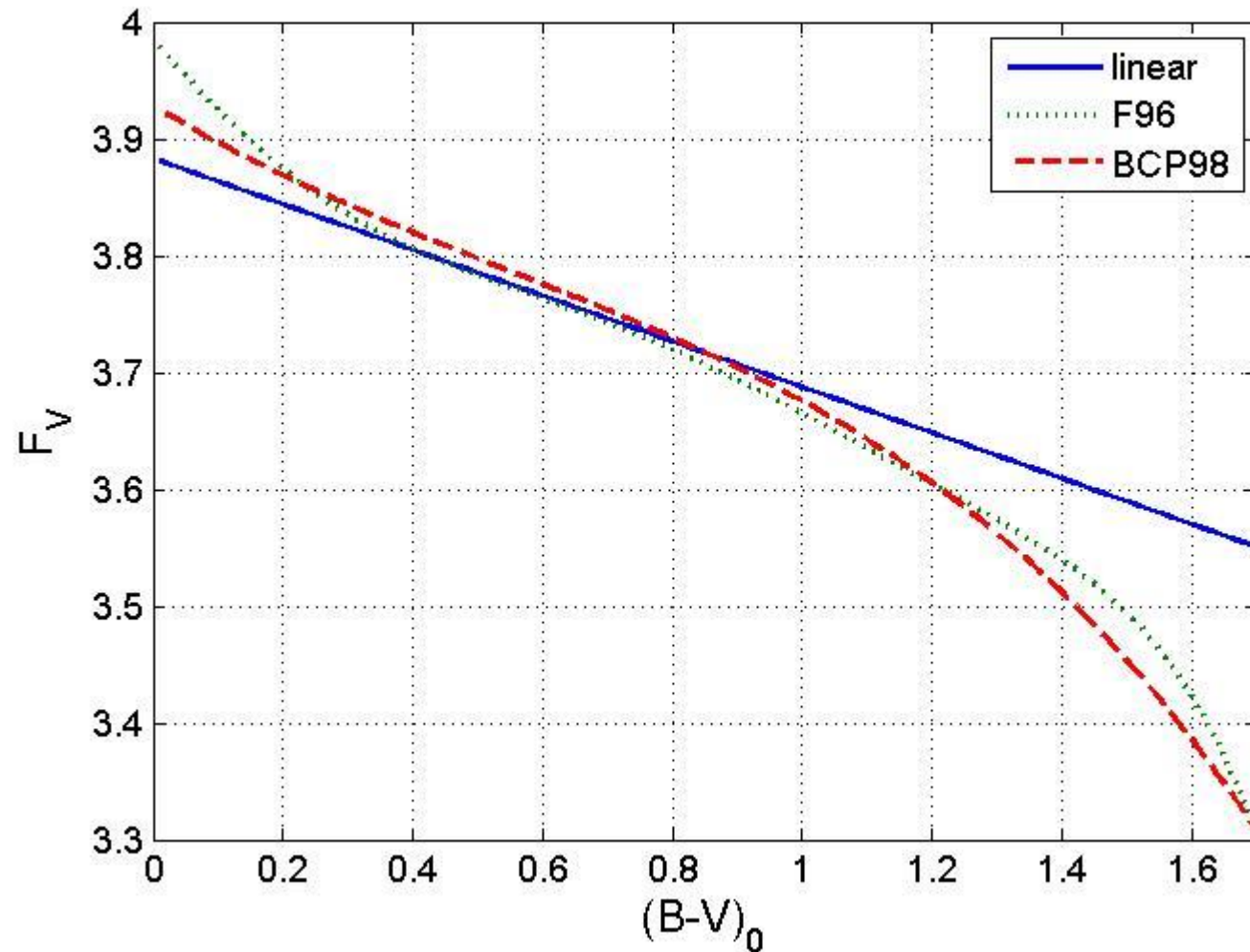
$$Y = 10 \cdot \lg T_{\text{eff}}^0 + M_{\text{bol}}^0 + A_V + (m - M)_0$$

- оба выражения совершенно идентичны!

- Главное преимущество нашего варианта метода BVW – отсутствие необходимости в априорных оценках избытка цвета $E(B-V)$
- Благодаря нелинейности откалиброванной функции $\Psi(CI_0)$ оценка избытка цвета естественным образом вытекает из решения задачи оптимизации
- Точность оценки $E(B-V)$ достигает 0.01-0.02 mag, при том, что разброс других оценок достигает 0.2 mag
(https://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/table_colourexcess.html)

Калибровки T_{eff} и $VC(\lambda)$:

- **Flower (1996)**: I-II, III-V, компиляция + радиусы
- **Bessel, Castelli, Plez (1998)**: теоретическое распределение энергии для разных $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$
- **Alonso, Arribas, Martinez-Roger (1999)**: $[\text{Fe}/\text{H}]$, $\lg g$, IRFM + радиусы
- **Sekiguchi, Fukugita (2000)**: $[\text{Fe}/\text{H}]$, $\lg g$, IRFM
- **Ramirez, Melendez (2005)**: III, $[\text{Fe}/\text{H}]$, IRFM
- **Biazzo, Frasca, Catalano, Marilli (2007)**: IRFM
- **Gonzalez Hernandez, Bonifacio (2009)**: IRFM
- **Worthey et al. (2011)**: эмпирическая, IRFM
- (Примечание: IRFM - InfraRed Flux Method)



- Сравнение линейной калибровки F_V (Kervela et al. 2004) с калибровками Flower (1996) и Bessel et al. (1998)
- Следует ожидать больших различий для цефеид самых больших и малых периодов и цефеид с большими амплитудами изменений показателя цвета

Наблюдательные данные

Фотометрические данные:

- многоцветная фотометрия в полосах BVRI - из базы данных Бердникова (2008)

Спектроскопические данные:

- лучевые скорости - из базы данных ИНАСАН-ГАИШ (Горыня и др., 1987-2018)
- эффективные температуры и показатели металличности - из каталога Luck (2018)

Расстояния (параллаксы):

- тригонометрические параллаксы из каталога GAIA DR2 + расстояния Bailer-Jones и др. (2018) с учётом систематической поправки к параллаксам (+53 μas) (Zinn и др., 2018)
- расстояния по зависимости "период-светимость" Бердникова и др. (1996) (Мельник и др., 2015)

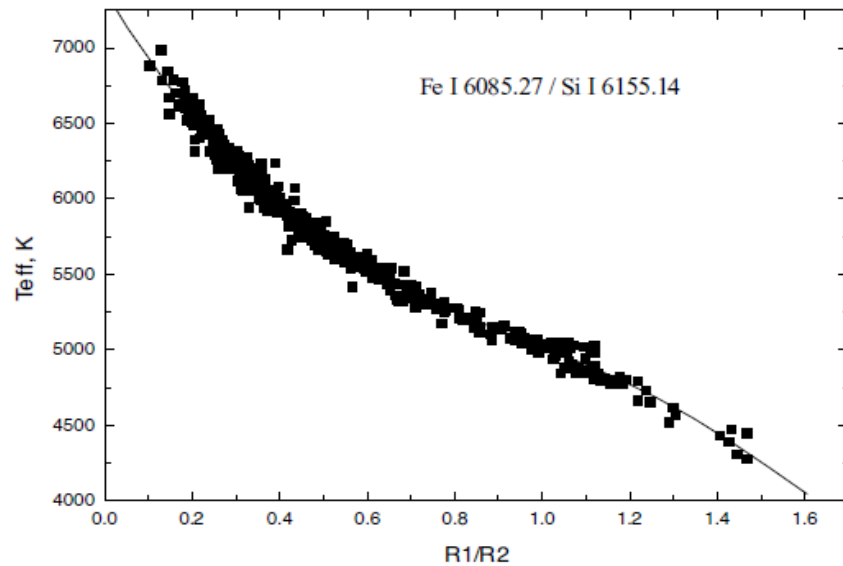
Всего в выборке 45 цефеид с разным качеством наблюдательного материала

Спектральный наблюдательный материал

- Luck & Andrievsky (AJ, 128, 343, 2004); Kovtyukh et al. (AJ, 129, 433, 2005); Andrievsky et al. (AJ, 130, 1880, 2005); Luck et al. (AJ, 136, 98, 2008); Luck (AJ, 156, 171, 2018):
 - Эшельные спектры с 2.1-м рефлектора Struve обсерватории McDonald ($R \sim 60000$, $S/N > 100$)
 - Добавлены спектры из архивов ELODIE (Haute-Provence), CORALIE (ESO) ($R \sim 42000$)
- **Наша работа:**
 - Лучевые скорости из базы данных ИЛС (ИНАСАН/ГАИШ, 1987-2018) и McMaster University (Canada)
(<http://crocus.physics.mcmaster.ca/Cepheid/>)
 - Фотометрия из базы данных Л.Н. Бердникова (2008)

Методика

- Определение температуры:
 - **LDR (Line Depth Ratio)** - Kovtyukh & Gorlova, A&A, 358, 587, 2000; Kovtyukh, MNRAS, 378, 617, 2007) - калибровки отношения глубин до 130 (!) пар линий



Пример:
отношение $I_{\text{low}} / I_{\text{high}}$

Важно: уширение близких по частоте линий не меняет отношения их глубин !

- Определение $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, V_t :
- Модели атмосфер Kurucz (код WIDTH9 / сетка моделей ATLAS9)

33 цефеиды с лучевыми скоростями и опубликованными мультифазными измерениями T_{eff}

- По спектральным данным о FGK - сверхгигантах выведена калибровка нормального цвета $(B-V)_0$ (Kovtuykh et al., MNRAS, 389, 1336, 2008):

- $$(B-V)_0 = 57.984 - 10.3587 * (\log T_{\text{eff}})^2 + 1.67572 * (\log T_{\text{eff}})^3 - 3.356 * \log g + 0.0321 * Vt + 0.2615 * [\text{Fe}/\text{H}] + 0.8833 * (\log g) * (\log T_{\text{eff}})$$

- и с её помощью Kovtuykh et al. определили нормальные цвета и избытки цвета 164 цефеид в 675 пульсационных фазах
- Точность определения температур варьируется от 10-20К до 30-50К в зависимости от S/N
- **Замечание:** значения $\log g$ не заслуживают доверия

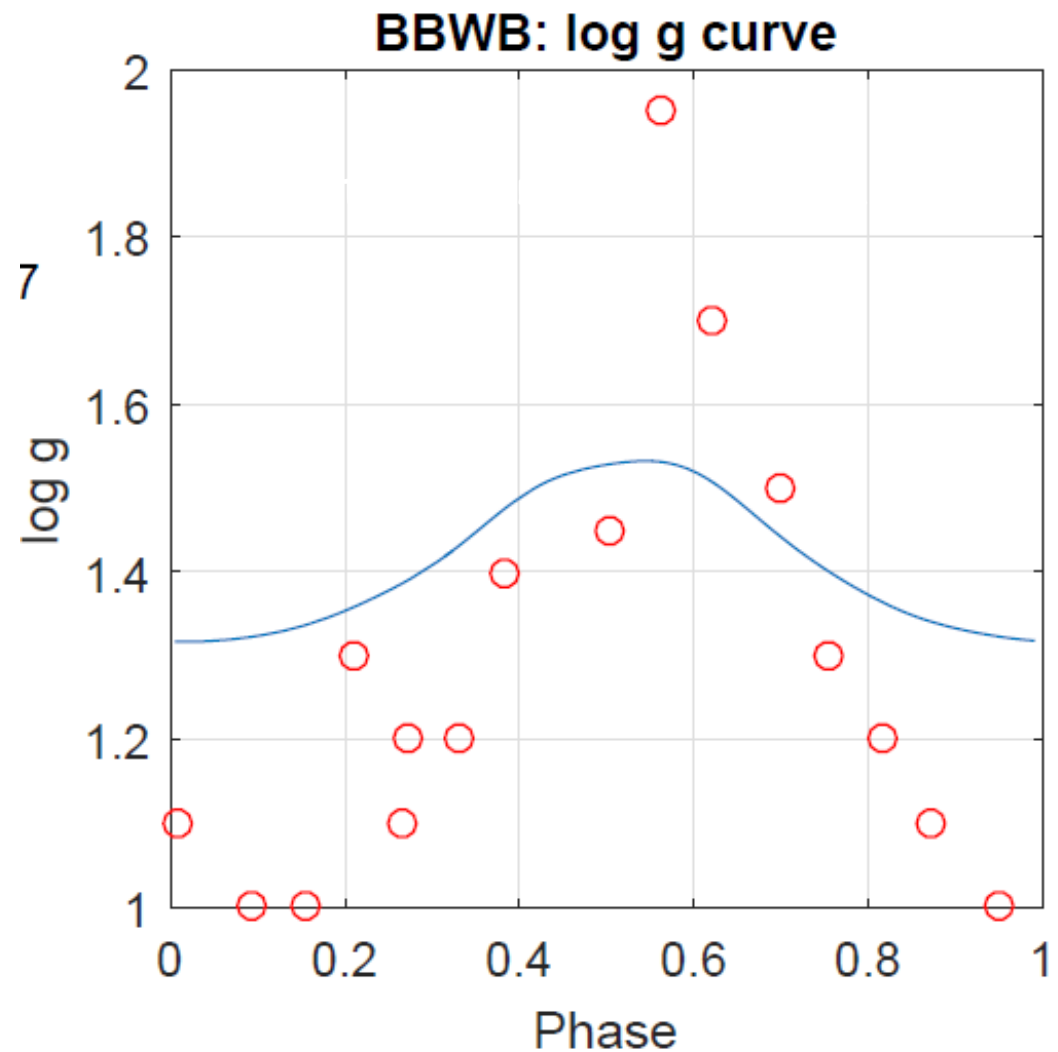
• CD Cyg

- Сравнение измеренных и вычисленных нами по изменениям радиуса (линия) значений $\lg g$

R: 79 - 99 R_0

($\Delta \lg g \sim 0.2$, оценки массы по эволюционному треку)

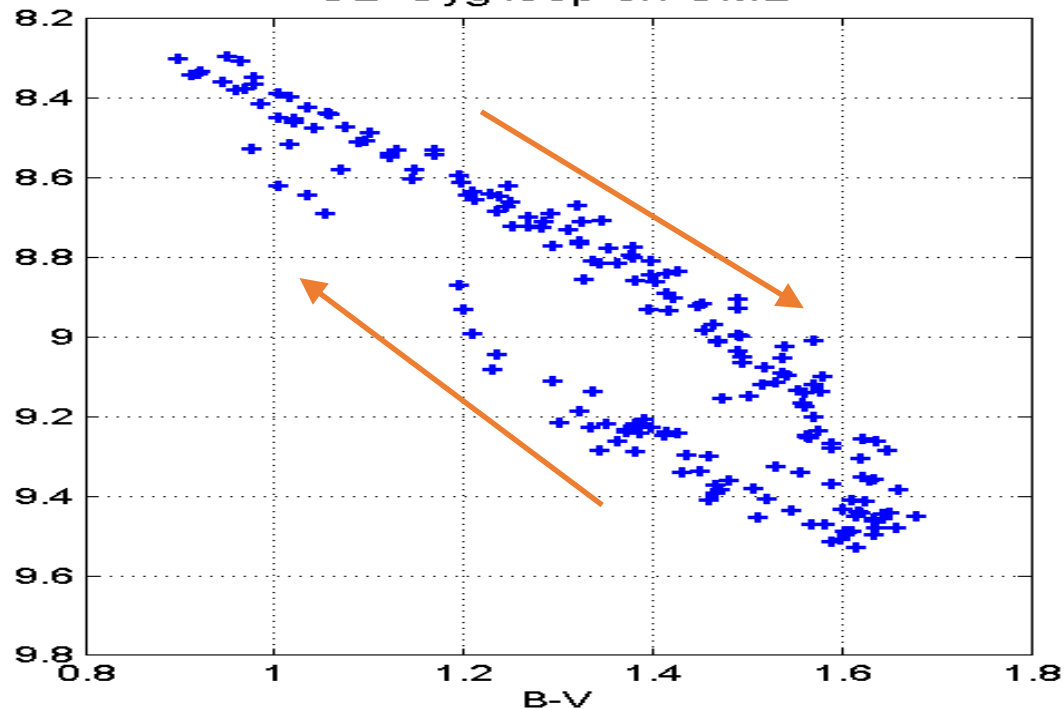
- Большие различия значений $\lg g$: не вполне корректная декомпозиция профиля Фойгта (разделения вклада электронного давления и Допплеровского уширения)?



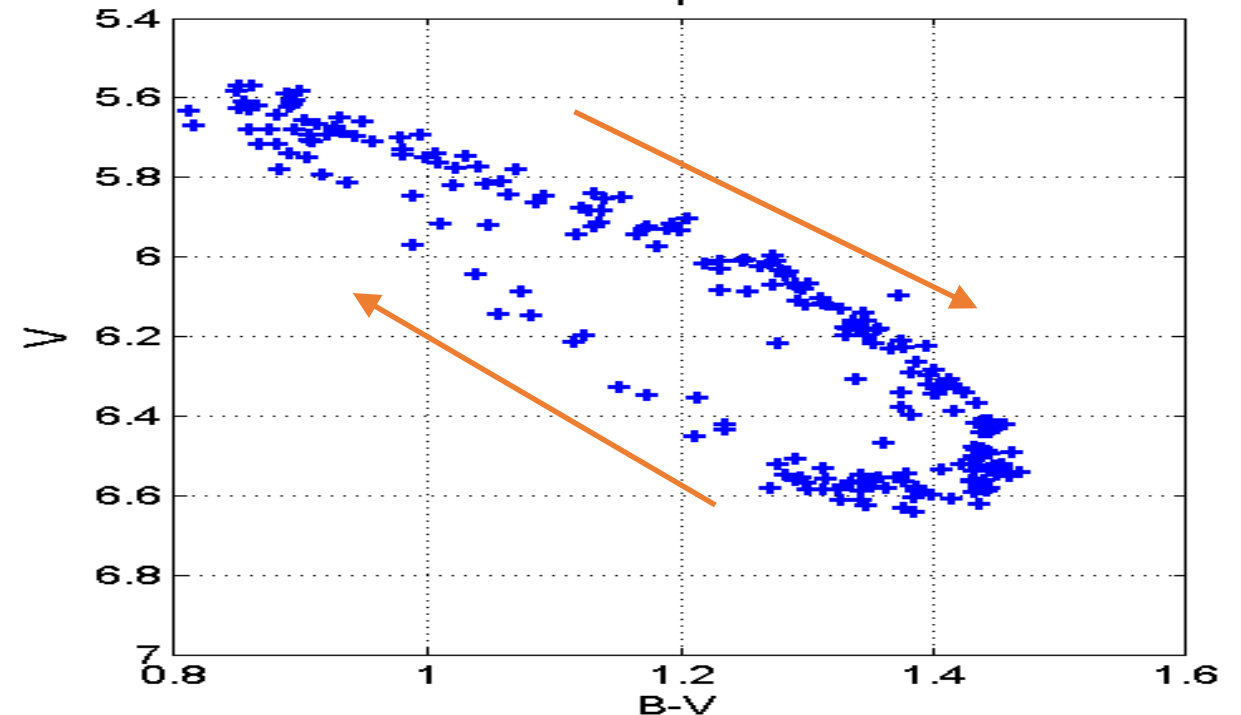
Вывод: калибровка нормальных цветов Kovtyukh et al. (2008) вызывает сомнения

- В чём ценность цефеид: даже единственная цефеида на диаграмме ГР ведёт себя как **популяция звёзд** с разными цветами, величинами, но с одинаковыми массами, избытками цвета, расстояниями и $[Fe/H]$ и почти одинаковыми значениями $\lg g$
- Попробуем на этой основе уточнить цветовые калибровки эффективной температуры, используя значения T_{eff} во всех фазах 33 цефеид (всего около 350 значений), вычисленные значения $\lg g$, $E(B-V)$ и известные значения $[Fe/H]$

CD Cyg loop on CMD



T Mon loop on CMD



Вывод калибровок $CI_0 - \lg T_{eff} - \lg g - [Fe/H]$ по 33 цефеидам с мультифазными измерениями температур

Метод итераций: (1) оценка $E(B-V)$ по исходным калибровкам F96 и VCP98;
(2) новая калибровка с использованием оценок $E(B-V)$
(Заболотских, Лазовик, Расторгуев, 2019)

• Исходная калибровка - VCP98

$$\lg T_{eff} = 3.88 (\pm 0.01) - 0.20 (\pm 0.0180) * (B-V)_0 + 0.026 (\pm 0.008) * (B-V)_0^2 + 0.009 (\pm 0.004) * \lg g - 0.010 (\pm 0.006) * (B-V)_0 * \lg g - 0.051 (\pm 0.017) * [Fe/H] + 0.051 (\pm 0.022) * (B-V)_0 * [Fe/H]$$

$$\bullet \text{ std} = 0.0047 (\sigma_T / T \sim 1.1 \%)$$

• Исходная калибровка - F96

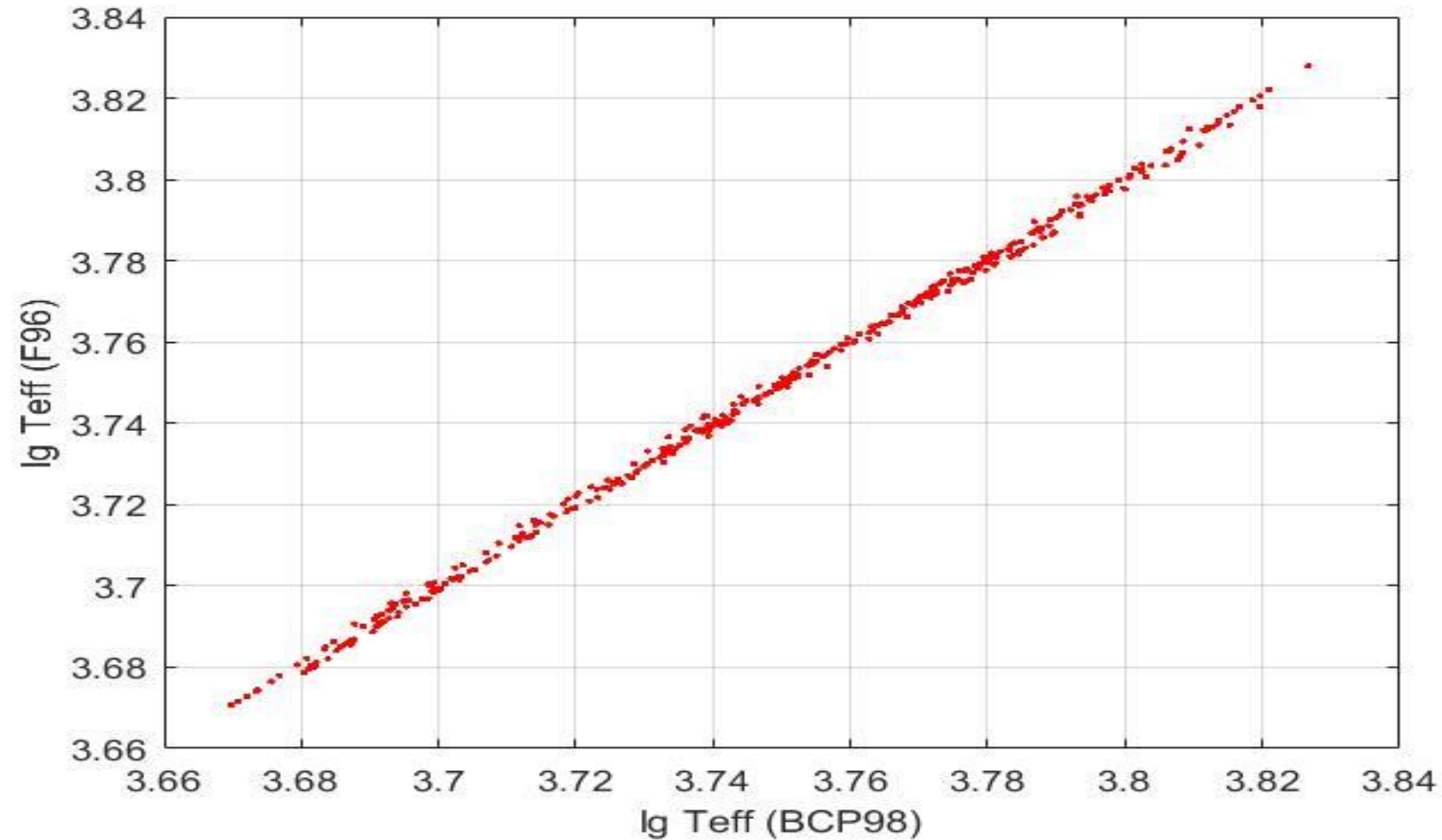
$$\lg T_{eff} = 3.87 (\pm 0.01) - 0.20 (\pm 0.018) * (B-V)_0 + 0.026 (\pm 0.008) * (B-V)_0^2 + 0.013 (\pm 0.004) * \lg g - 0.010 (\pm 0.006) * (B-V)_0 * \lg g - 0.031 (\pm 0.017) * [Fe/H] + 0.030 (\pm 0.023) * (B-V)_0 * [Fe/H]$$

$$\bullet \text{ std} = 0.0047 (\sigma_T / T \sim 1.1\%)$$

- Сравнение новых (уточнённых) калибровок Flower (1996) и Bessel, Castelli, Plez (1998)

- Новая калибровка " $\lg T_{\text{eff}} - (B-V)_0 - \lg g$ " для цефеид открывает возможность оценки избытка цвета даже по немногочисленным спектроскопическим измерениям T_{eff} !



В дальнейшей работе использована эта калибровка



[Fe/H] - из наблюдений

$\lg g$ - по эволюционным трекам

Алгоритмы анализа данных

- 1) Оцениваем избыток $E(B-V)$, обеспечивающий наилучшее совпадение измеренных T_{eff} с кривой T_{eff} , рассчитанной по показателям цвета с калибровками F96, VSP98  По T_{eff} и пульсационным радиусам $R(\varphi)$ рассчитываем кривую блеска M_V и определяем светимость M_V и расстояние до цефеиды
- 2) Непосредственно вычисляем кривую M_V по измеренным значениям $R(\varphi)$ и T_{eff} ; $E(B-V)$ используем только для оценки $BC(V)$  Подбираем $ModV_{app}$ для наилучшего совпадения вычисленной и наблюдаемой (используемой в качестве шаблона) кривых блеска

• CD Cyg

• BCP98

• $E(B-V) \approx 0.56^m$

• $\langle M_V \rangle_I \approx$

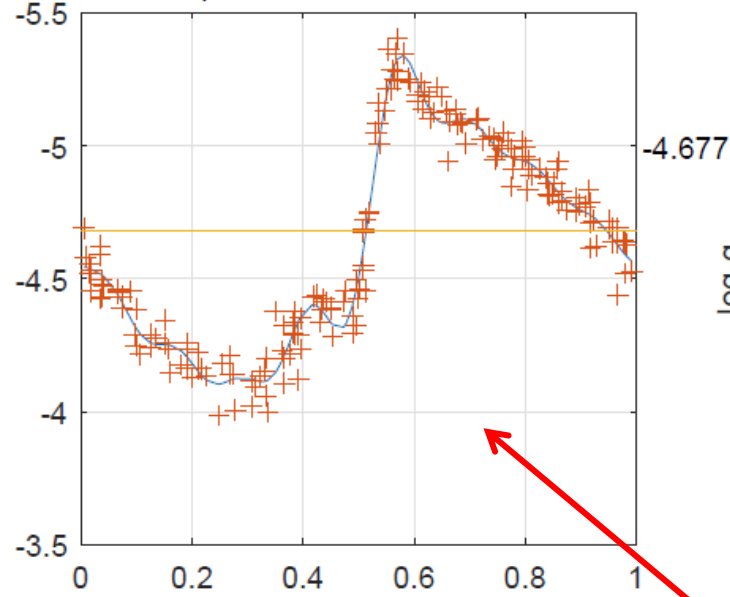
• -4.68^m (1)

• -4.70^m (2)

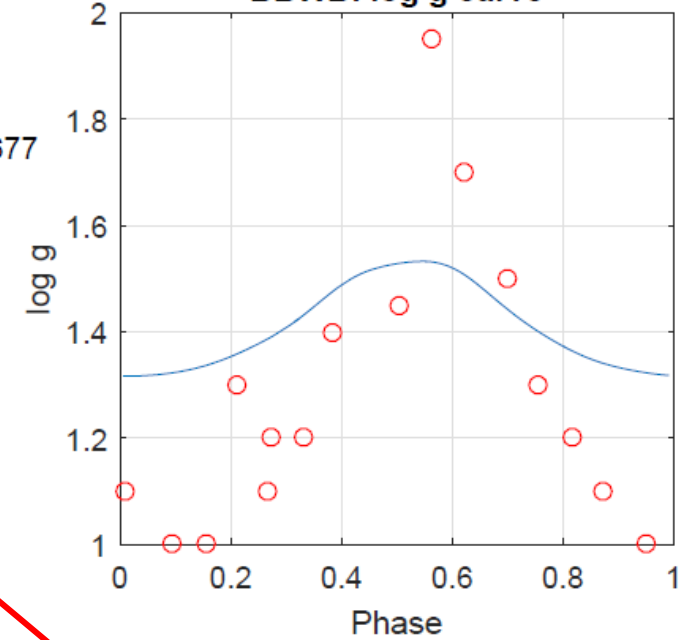
• $ModV(app) \approx$
 13.62^m

• $C_M. \lg g !$

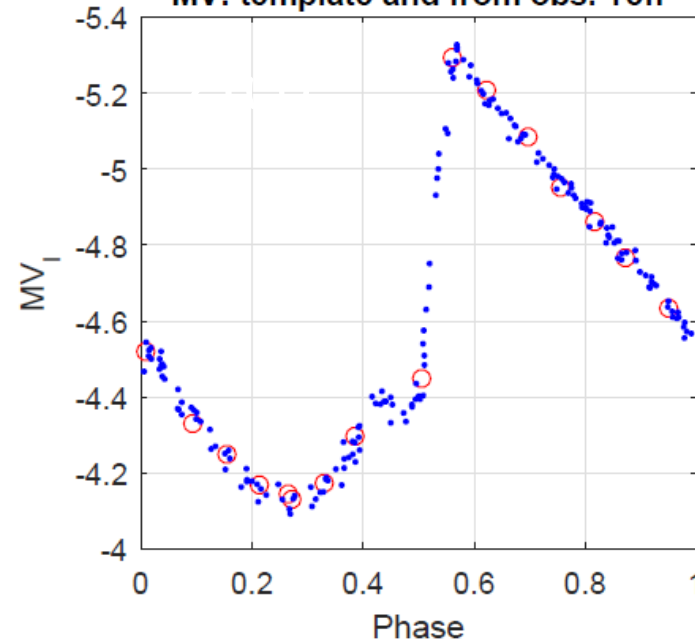
BBWB M_V : from orig. and smoothed CI



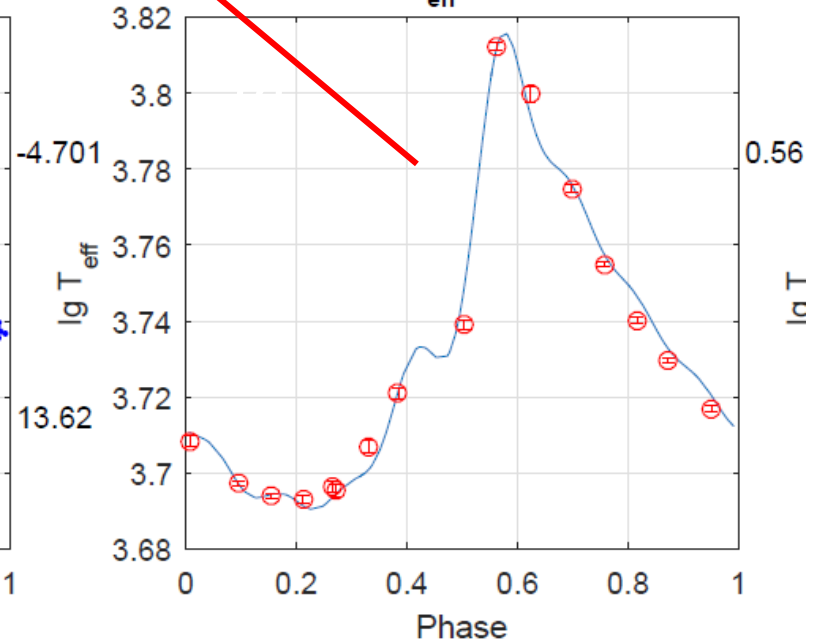
BBWB: $\log g$ curve



MV: template and from obs. Teff



BBWB: $\lg T_{eff}$ curve from CI



• δ Cep

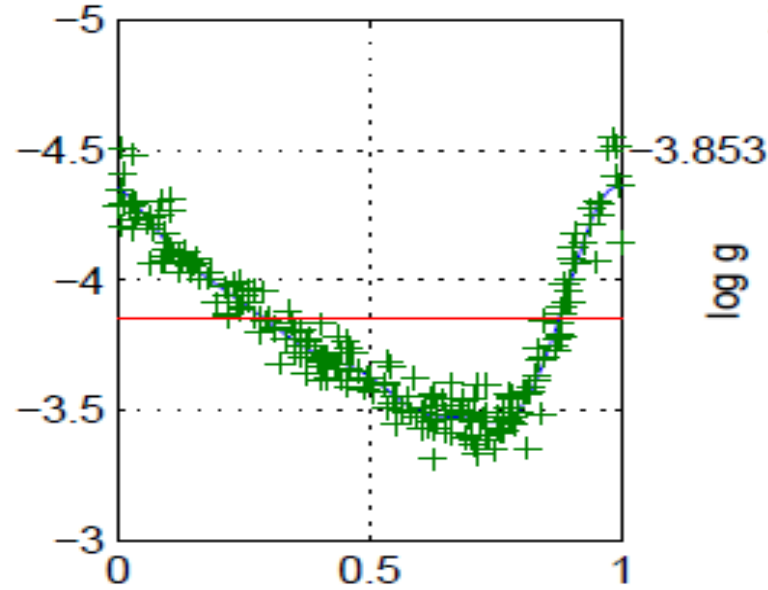
• F96

• $E(B-V) \approx 0.10^m$

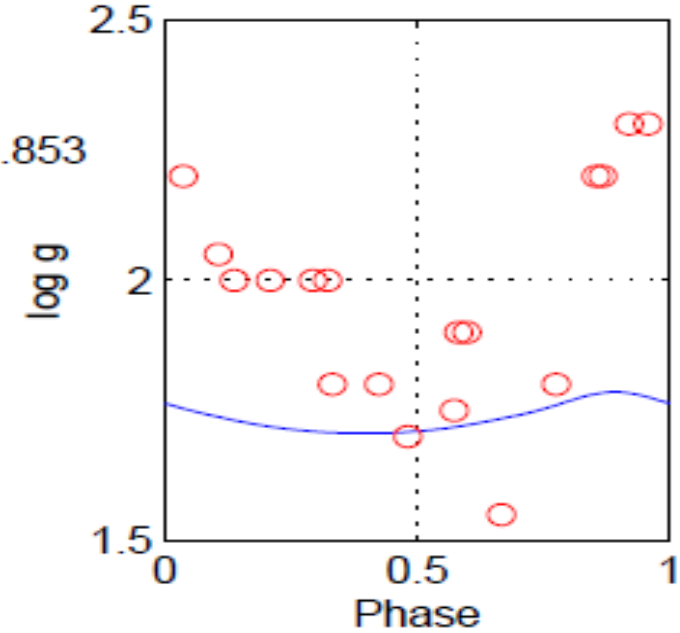
• $\langle M_V \rangle_I \approx -3.85^m$

• C_M . $\lg g$!

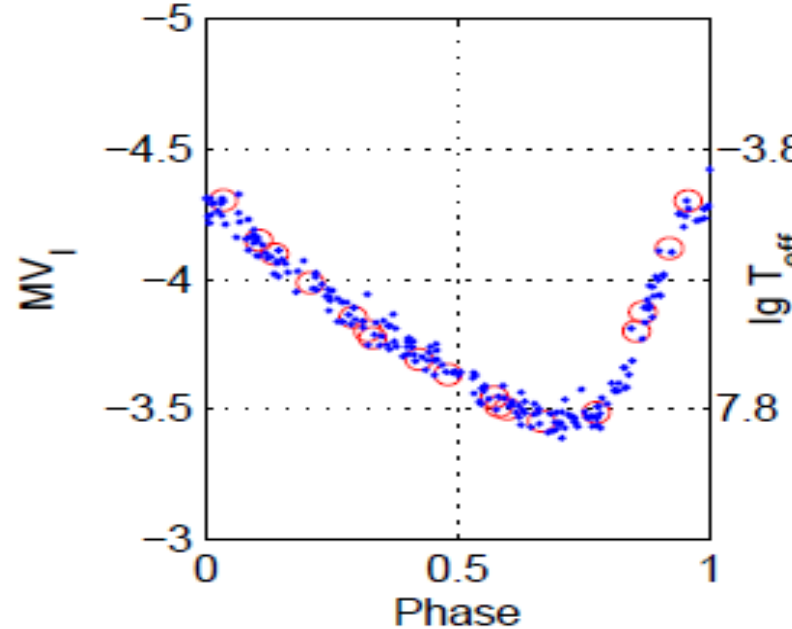
BBWB M_V : from orig. and smoothed CI



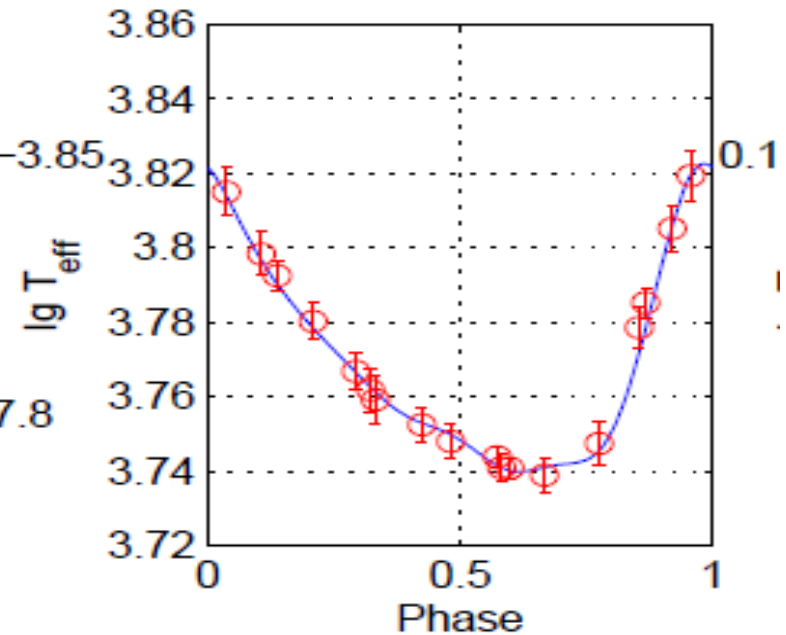
BBWB: $\log g$ curve



MV: template and from obs. T_{eff}

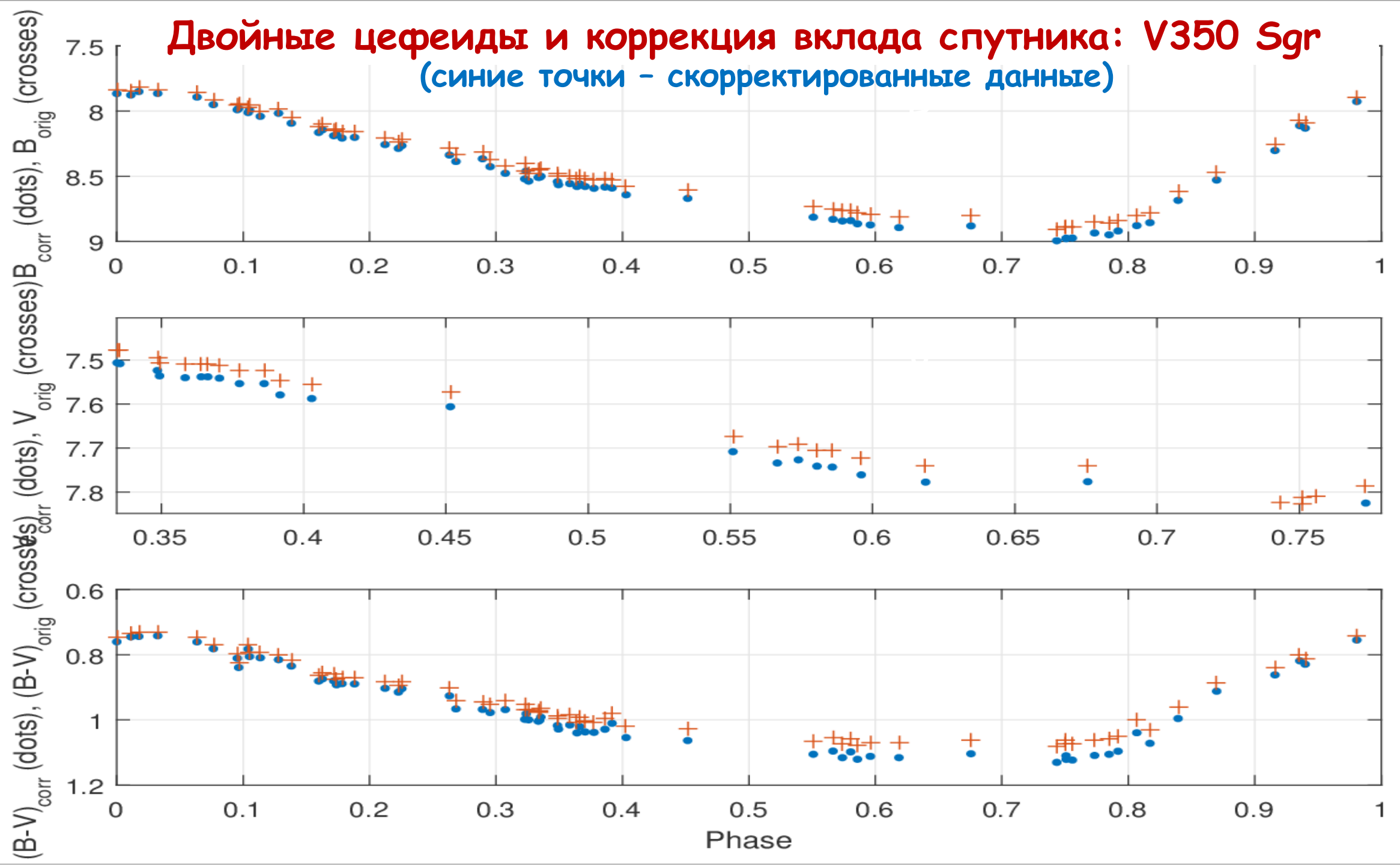


BBWB: $\lg T_{\text{eff}}$ curve from CI



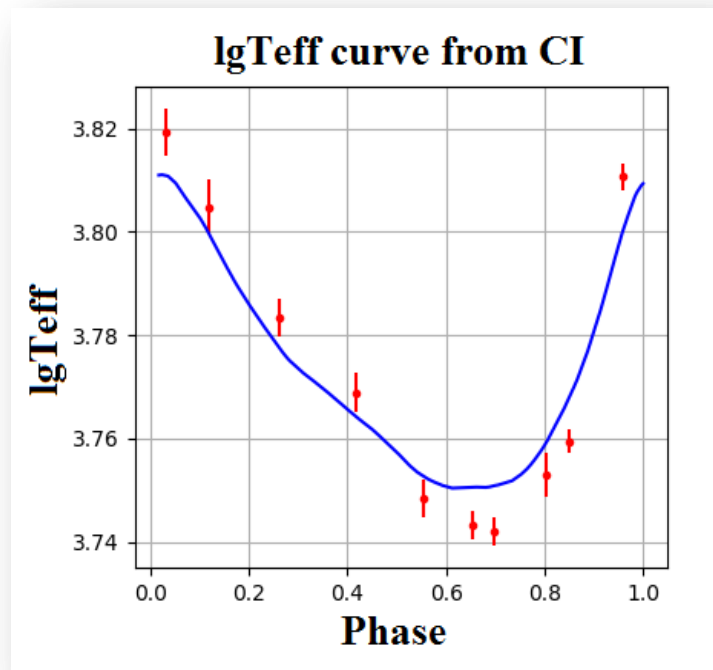
Двойные цефеиды и коррекция вклада спутника: V350 Sgr

(синие точки - скорректированные данные)

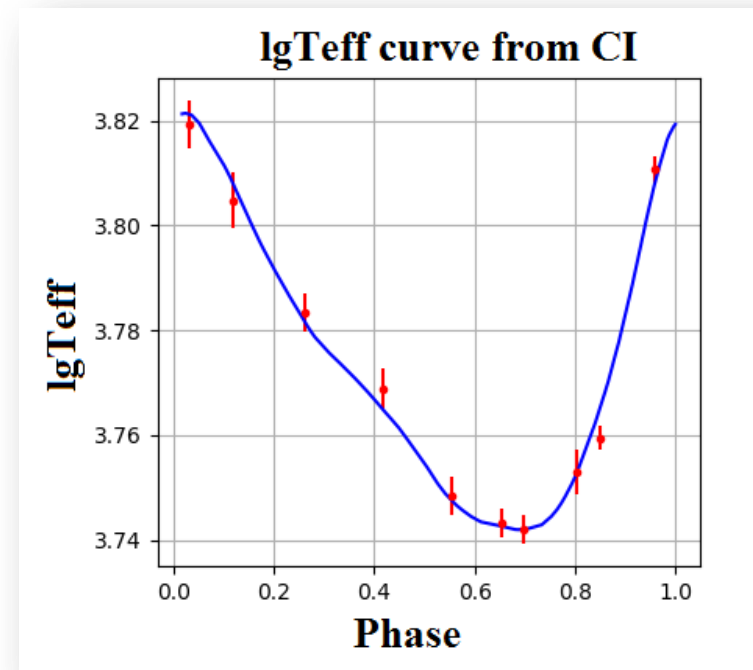


Двойные цефеиды: улучшение согласия (пример AW Per)

До корректировки
фотометрических данных



После корректировки
фотометрических данных



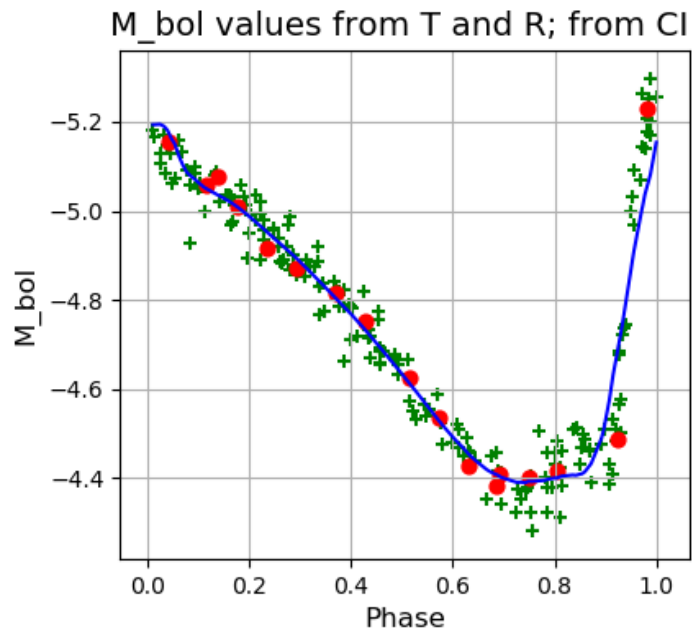
Распределение цефеид по выборкам: критерии отбора

1. Общий объем и качество данных
2. Равномерность заполнения наблюдениями соответствующей фазовой кривой
3. Близость эпох фотометрических и спектральных наблюдений
4. Скорость изменения периода цефеиды
5. Наличие горячего компонента
6. Положение цефеиды в полосе нестабильности
7. Уверенность в моде пульсаций

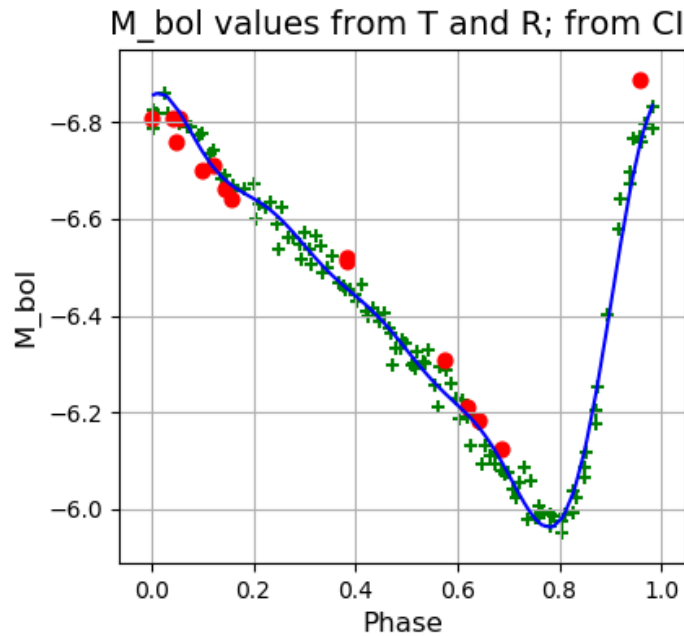
- Первая выборка - 23 цефеиды
- Вторая выборка - 10 цефеид
- Третья выборка - 12 цефеид

Примеры цефеид различных выборок (цефеиды первой выборки)

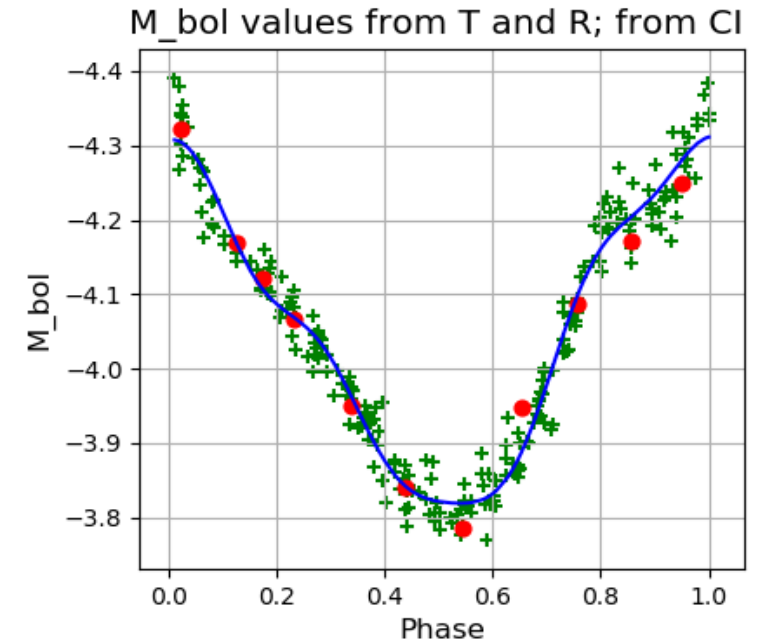
CD Cyg



SV Vul

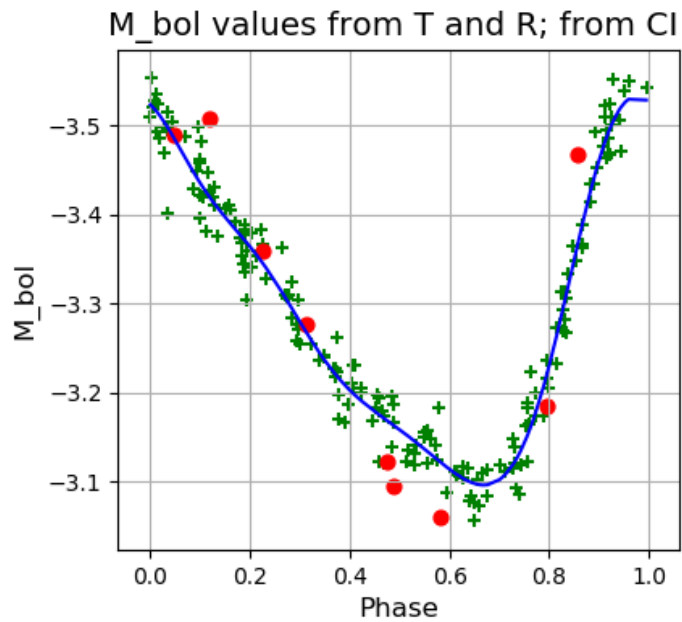


YZ Sgr

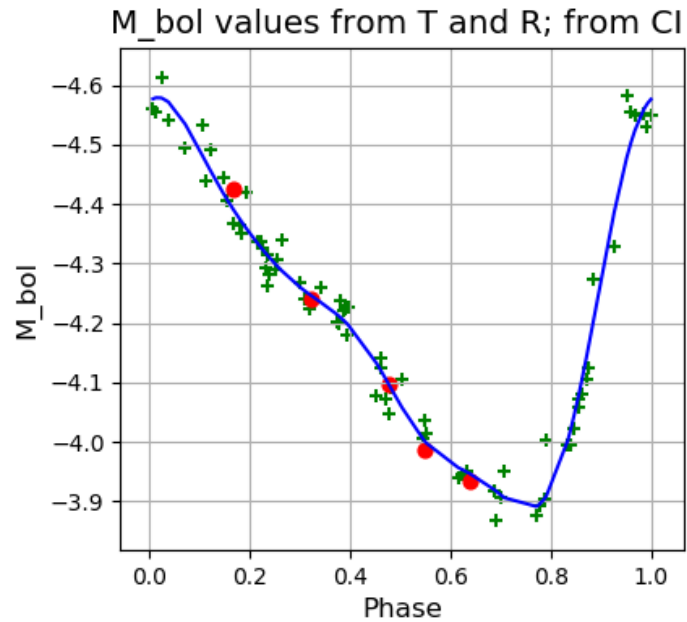


Примеры цефеид различных выборок (цефеиды второй выборки)

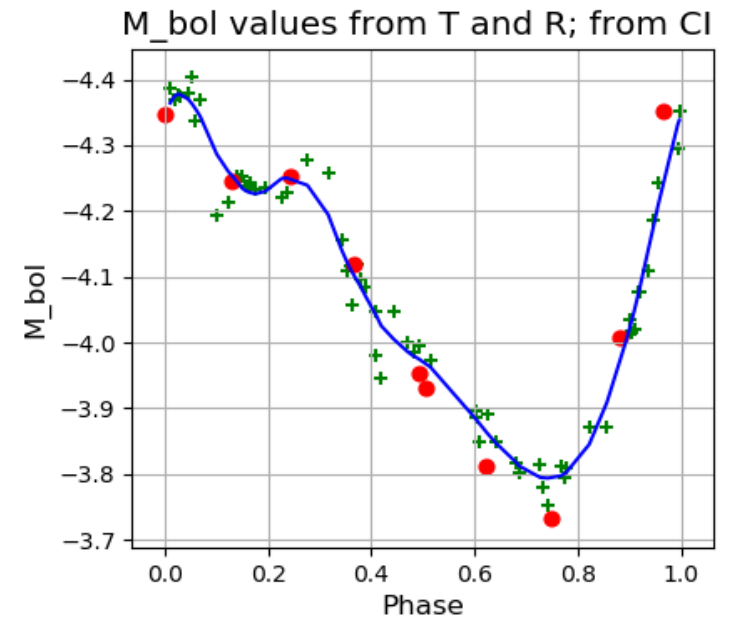
SS Sct



XX Sgr

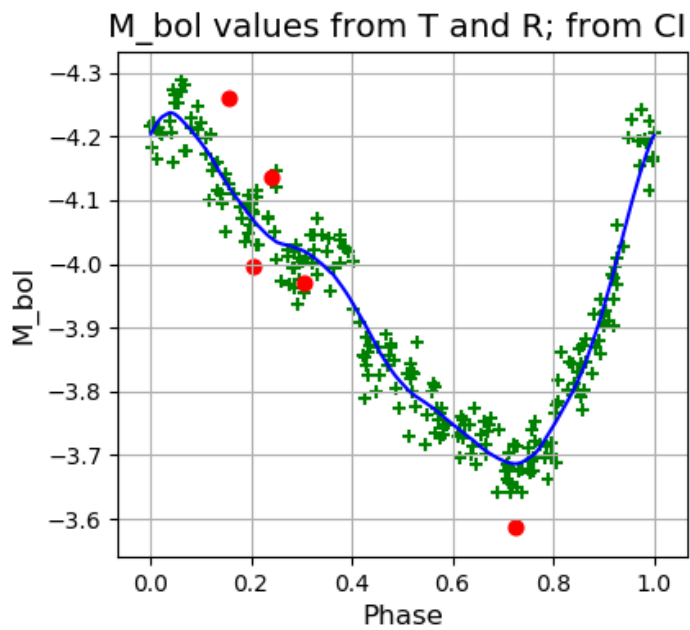


RX Cam

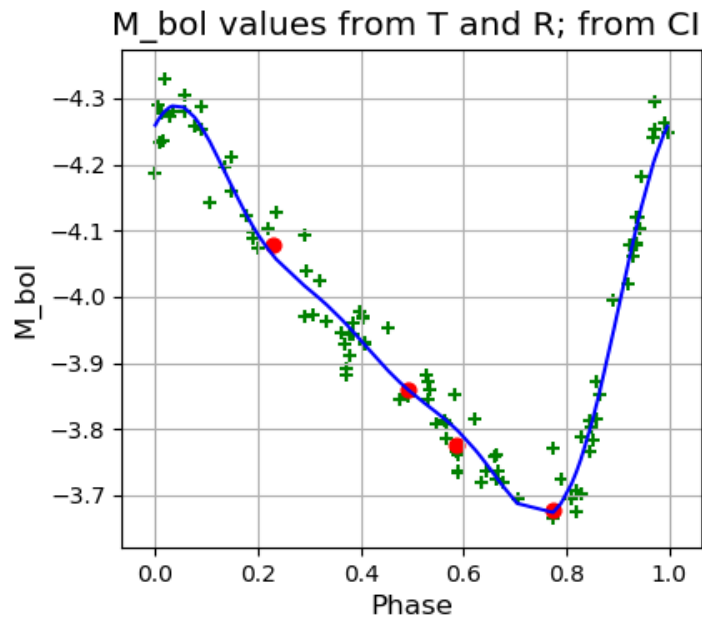


Примеры цефеид различных выборок (цефеиды третьей выборки)

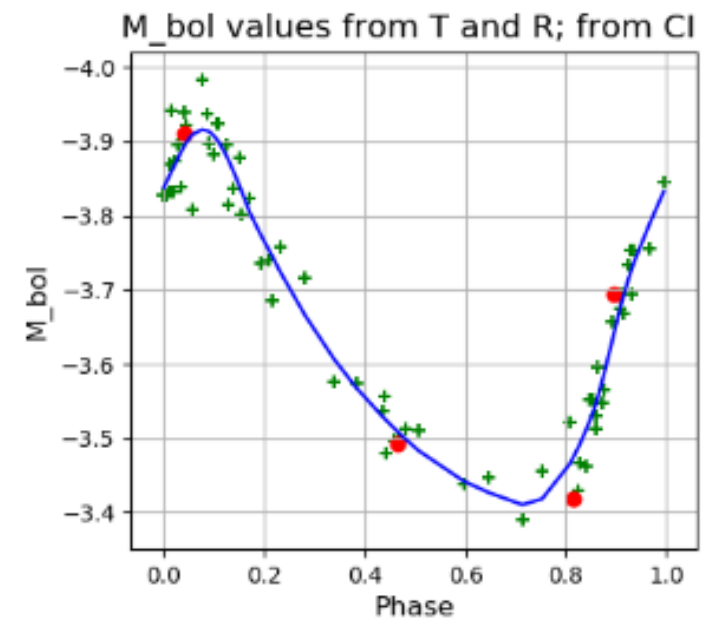
U Aql



CV Mon



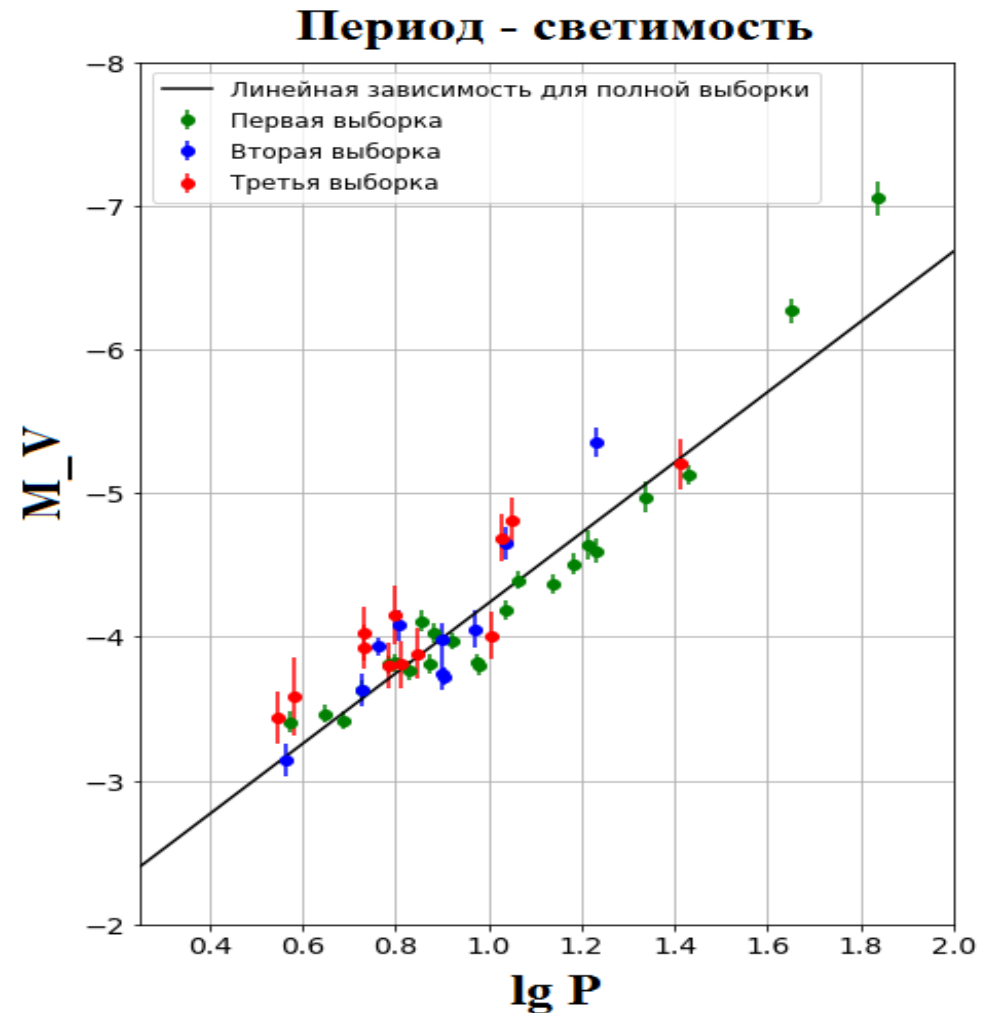
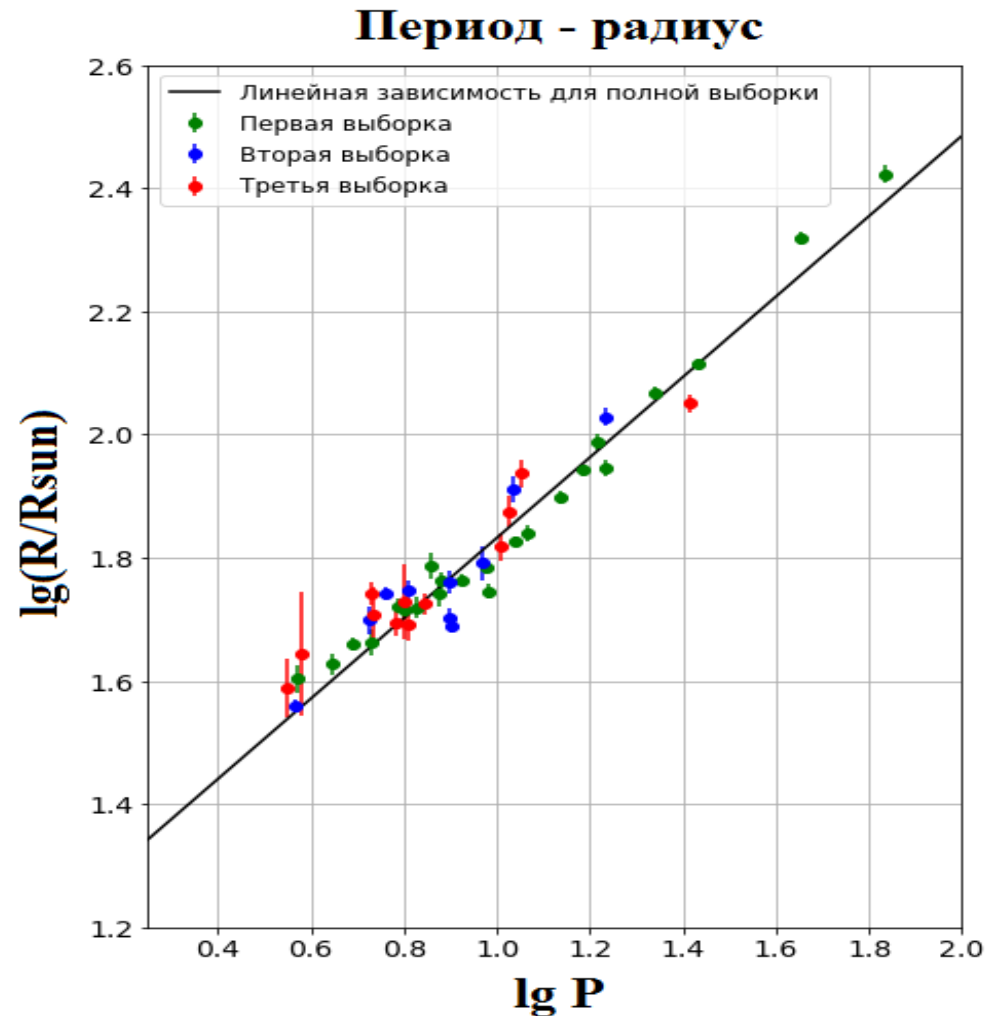
BE Mon



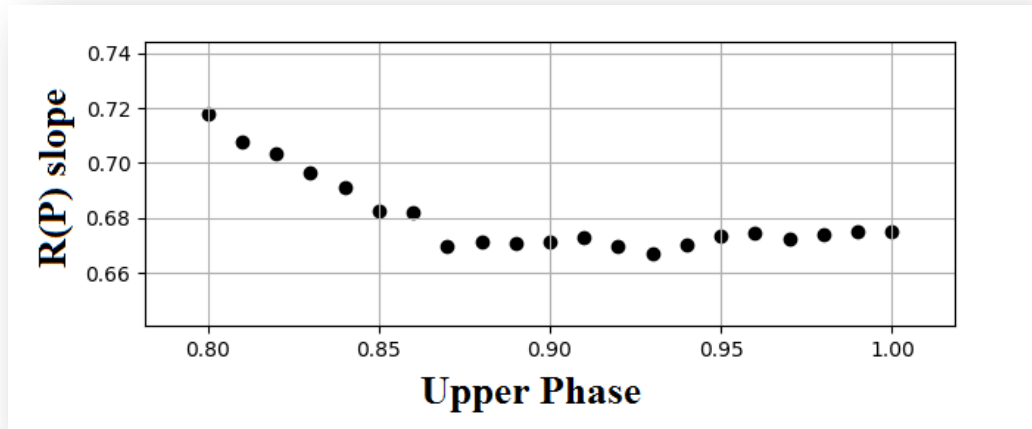
Итоговые зависимости (интервал фаз 0.00-1.00)

$$\lg R = (0.653 \pm 0.021) \cdot \lg P + (1.180 \pm 0.022)$$

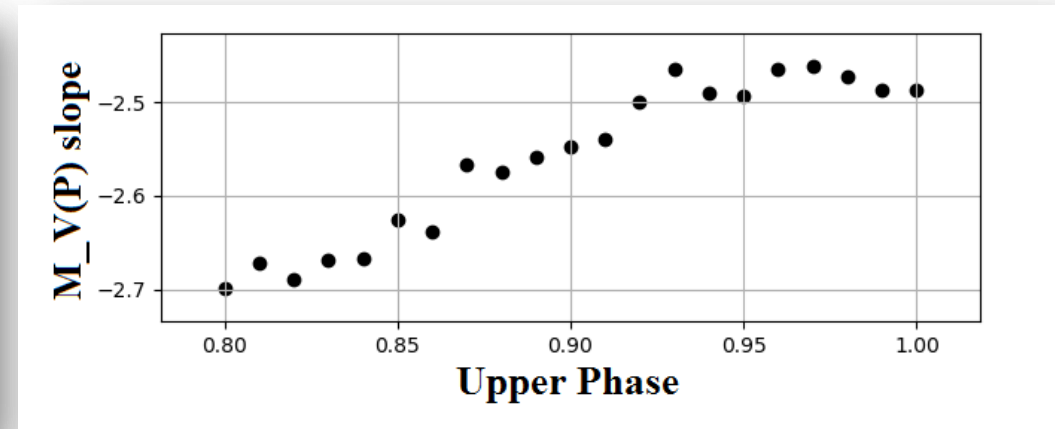
$$M_V = - (2.45 \pm 0.15) \cdot \lg P - (1.79 \pm 0.14)$$



Поиск оптимального диапазона фаз

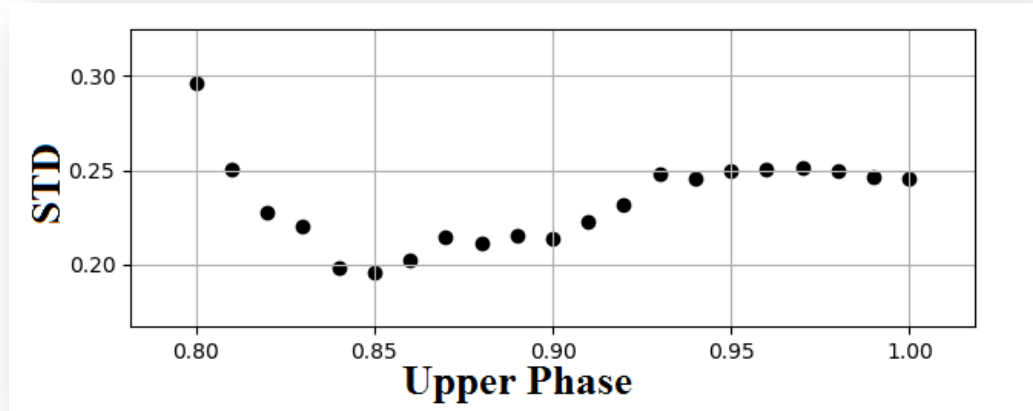


Наклон зависимости "период-радиус" VS верхняя граница интервала фаз

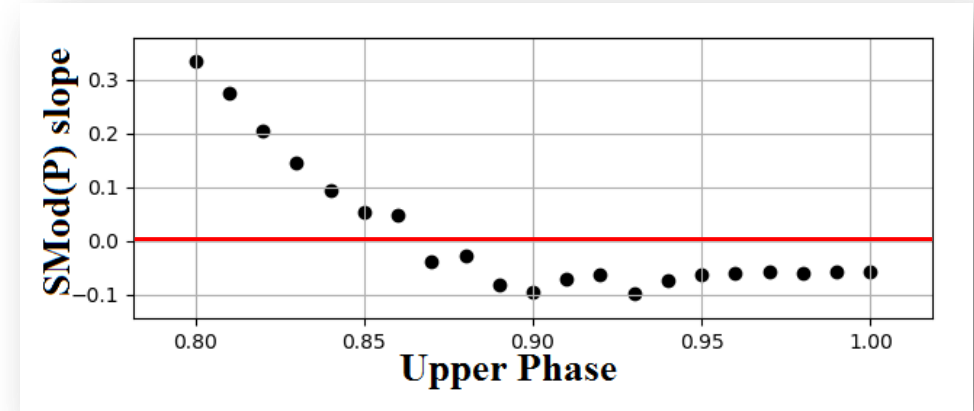


Наклон зависимости "период-светимость" VS верхняя граница интервала фаз

Поиск оптимального диапазона фаз



Среднеквадратичное отклонение относительно линейной зависимости "период-светимость" VS верхняя граница интервала фаз

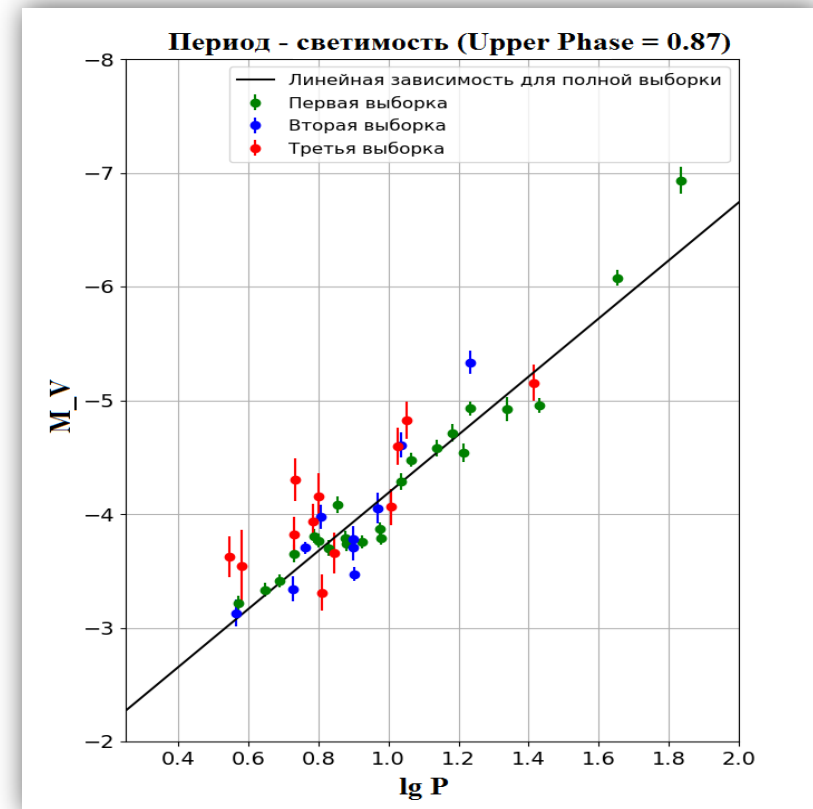
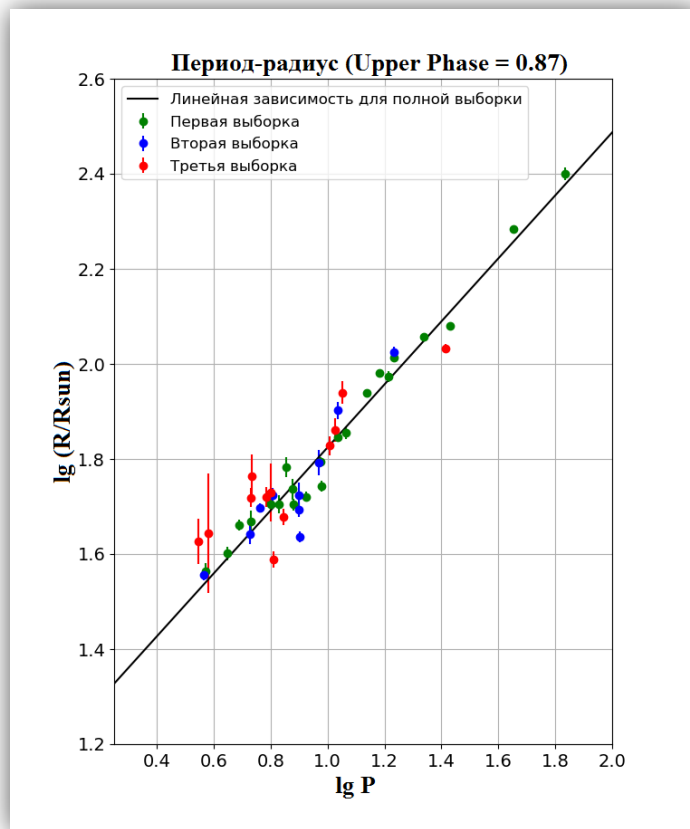


Наклон зависимости "период - разность расстояний (вычисленных нами и по GAIA DR2)" VS верхняя граница интервала фаз

Итоговые зависимости (фазы 0.00-0.87)

$$\lg R = (0.671 \pm 0.022) \cdot \lg P + (1.154 \pm 0.026)$$

$$M_V = - (2.60 \pm 0.17) \cdot \lg P - (1.58 \pm 0.16)$$



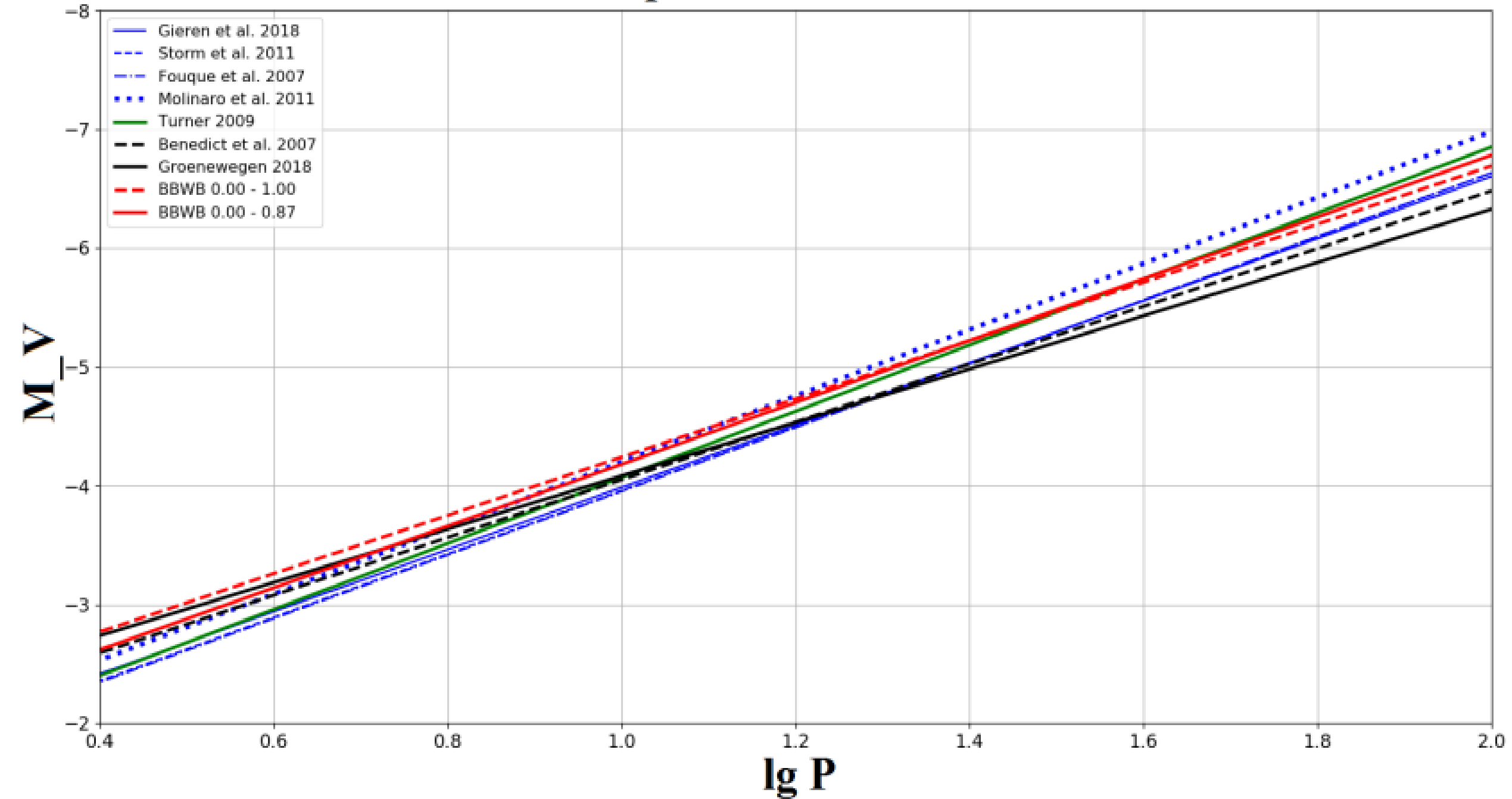
Сравнение зависимости "период-радиус" с результатами других работ $\lg R \approx a \cdot \lg P + b$

Работа	a	b
Sachkov et al. (1998)	0.62 ± 0.03	1.23 ± 0.03
Данная работа (0.00 - 1.00)	0.653 ± 0.021	1.180 ± 0.022
Данная работа (0.00 - 0.87)	0.671 ± 0.022	1.154 ± 0.026
Gallenne et al. (2017)	0.684 ± 0.007	1.135 ± 0.002
Groenewegen (2007)	0.686 ± 0.036	1.134 ± 0.034
Sachkov (2002)	0.73 ± 0.02	1.09 ± 0.01
Turner, Burke (2002)	0.747 ± 0.028	1.071 ± 0.025
Molinaro et al. (2011)	0.75 ± 0.03	1.10 ± 0.03
Storm et al. (2004)	0.77 ± 0.02	1.05 ± 0.03

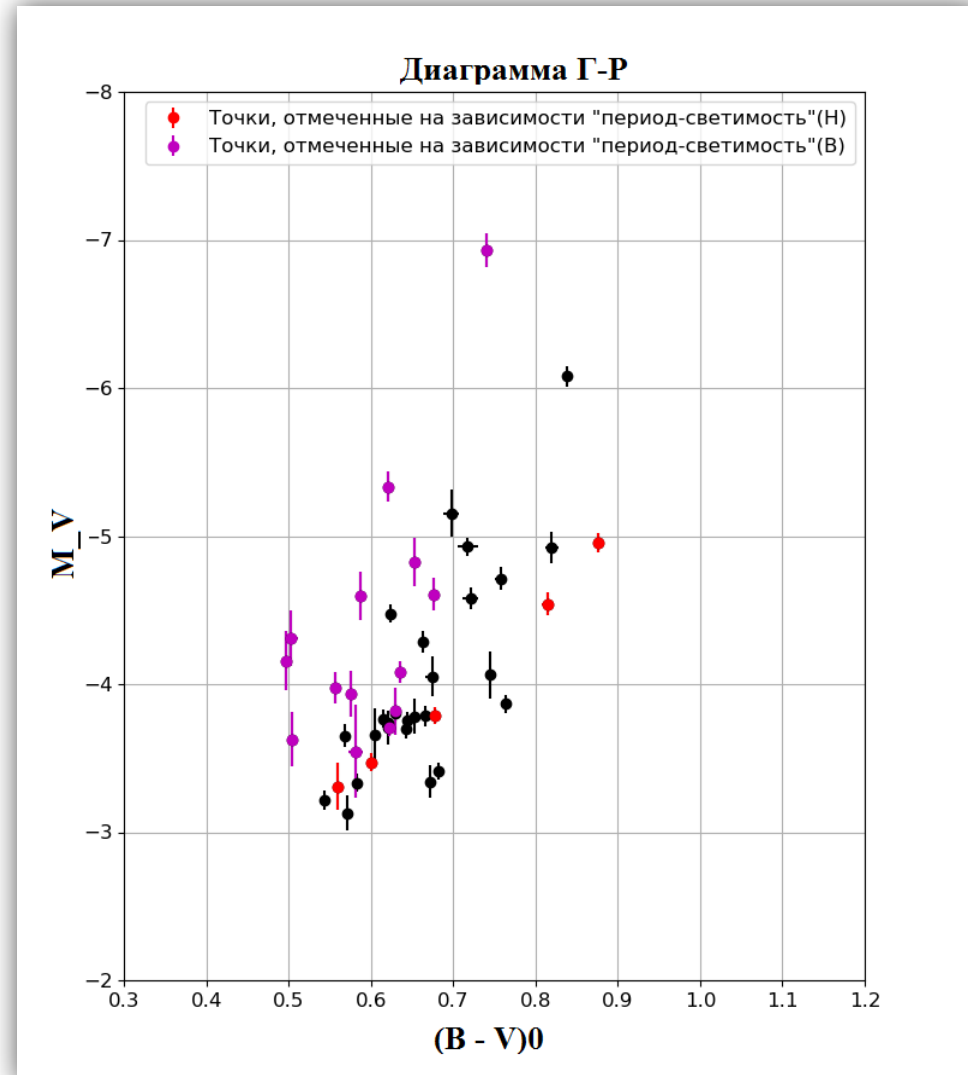
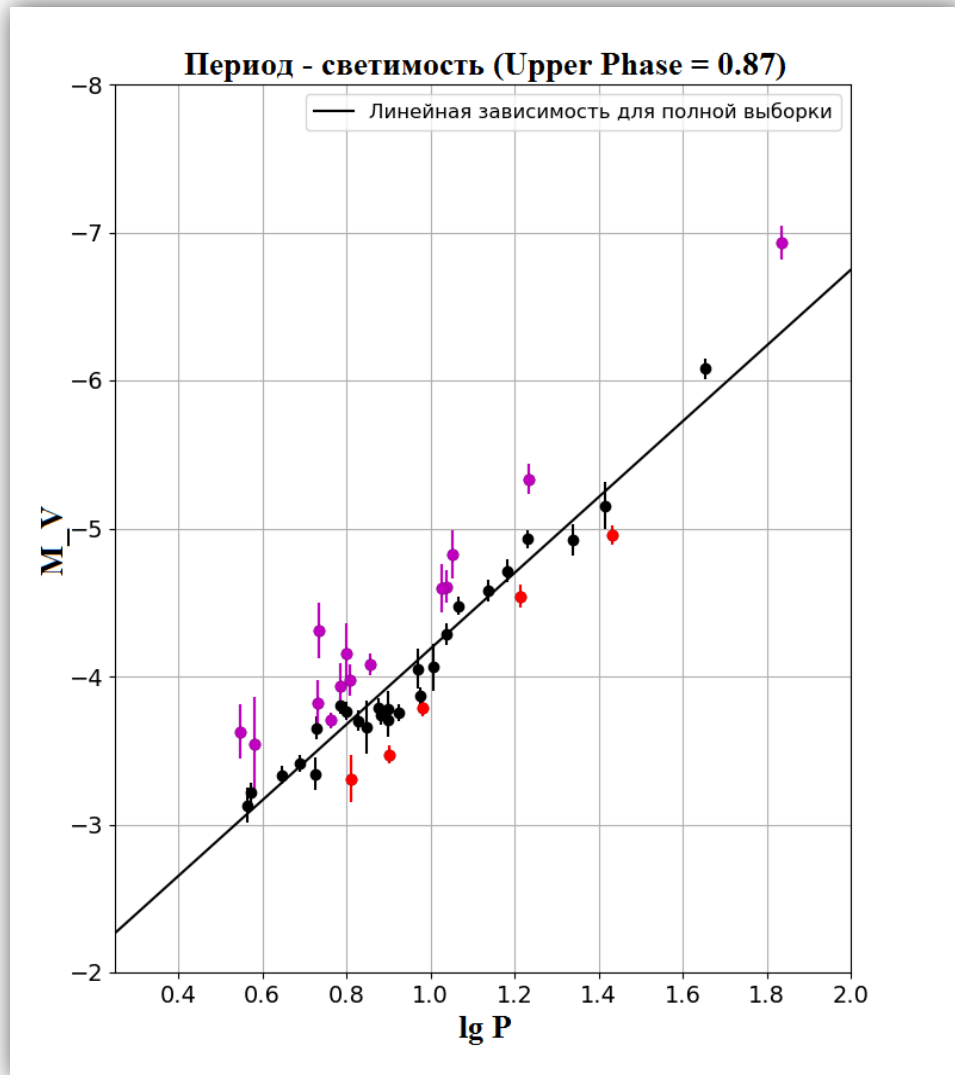
Сравнение зависимости "период-светимость" с результатами других работ $M_V = a \cdot \lg P + b$

Работа	a	b	Метод
Groenewegen (2018)	$- 2.24 \pm 0.14$	$- 1.84 \pm 0.12$	Тригонометрический параллакс
Benedict et al. (2007)	$- 2.43 \pm 0.12$	$- 1.62 \pm 0.02$	
Данная работа (0.00 - 1.00)	$- 2.45 \pm 0.15$	$- 1.79 \pm 0.14$	Метод максимального правдоподобия (BBWB)
Данная работа (0.00 - 0.87)	$- 2.60 \pm 0.17$	$- 1.58 \pm 0.16$	
Gieren et al. (2018)	$- 2.62 \pm 0.10$	$- 1.37 \pm 0.04$	Метод поверхностной яркости (IRSB)
Storm et al. (2011)	$- 2.67 \pm 0.10$	$- 1.29 \pm 0.03$	
Fouque et al. (2007)	$- 2.68 \pm 0.09$	$- 1.28 \pm 0.03$	
Molinaro et al. (2011)	$- 2.78 \pm 0.11$	$- 1.42 \pm 0.11$	
Turner (2009)	$- 2.78 \pm 0.12$	$- 1.29 \pm 0.10$	
			Цфеиды в скоплениях

Период - светимость



Положение цефеид в полосе неустойчивости



Новая шкала расстояний и кинематика цефеид

По новой зависимости "период-светимость" с использованием параметров кривых блеска (средние величины $\langle V \rangle_I$ из базы данных Бердникова и др., 2000), усреднённых избытков цвета из базы данных https://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/table_colourexcess.html для 230 цефеид с самыми точными лучевыми скоростями и собственными движениями GAIA DR2 рассчитаны гелиоцентрические расстояния и исследована кинематика выборки методом статистических параллаксов.

Кинематические параметры выборки цефеид

U_0	V_0	W_0	s_{U_0}	s_{W_0}	p	fR	fT	χ_{i_0}	Pitch
-10.62	-13.30	-7.64	12.87	6.23	0.99	-2.51	+1.87	152.6	-11.3
км/с	км/с	км/с	км/с	км/с		км/с	км/с	градус	градус

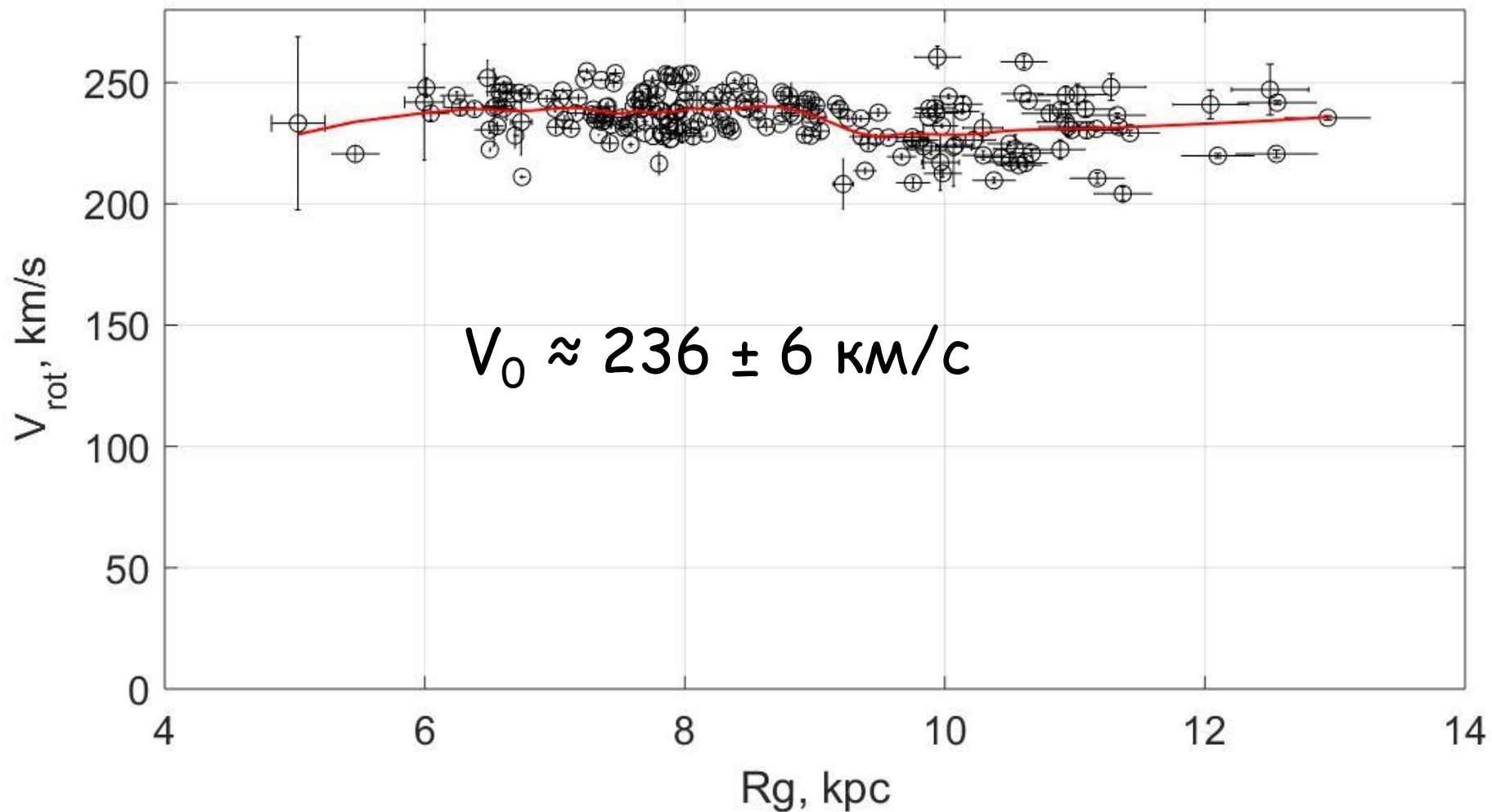
$W0$	dW/dR	d^2W/dR^2	d^3W/dR^3	...
29.0	-3.94	0.84	-0.07	
км/с/кпк	км/с/кпк ²	км/с/кпк ³	км/с/кпк ⁴	

Коэффициент шкалы $p \approx 0.99 \pm 0.02$ ($= r_{adopted} / r_{true}$)
в пределах ошибок неотличим от единицы



Шкала расстояний не имеет заметной систематической ошибки !

Плоская кривая вращения Галактики по 230 цефеидам с расстояниями по новой зависимости "период-светимость"



Дальнейшие перспективы

1. Работа с фотометрическими данными в длинноволновом диапазоне
2. Расширение выборки цефеид, уточнение зависимостей "период-радиус" и "период-светимость"
3. Расчёт проекционного фактора по данных о потемнении к краю лимба из наблюдений транзитов экзопланет
4. Работа с цефеидами Магеллановых Облаков
5. Работа с пульсирующими звездами других типов

Спасибо за внимание