

УДК 520.16:520.82.054

Об учете атмосферной экстинкции при гетерохромной фотометрии звезд

Т. В. Выборная, Г. А. Терез

Рассчитаны коэффициенты атмосферной экстинкции для фотометрической системы *UBV* и системы ϕ для звезд различных спектральных классов и классов светимости и разных спектральных кривых прозрачности земной атмосферы.

ON THE ATMOSPHERIC EXTINCTION COEFFICIENTS FOR HETEROCHROMATIC PHOTOMETRY OF STARS, by Vybornaya T. V., Terez G. A.— With the aim of studying the bandwidth effect the atmospheric extinction coefficients are calculated for the photometric system *UBV* and system ϕ of the photometer, in which a photomultiplier with stibium-caesium photocathode serves as a receiver, within the airmass interval of 1—4. 35 curves of energy distribution in the spectra of stars of different spectral classes and luminosities and 5 spectral curves of the terrestrial atmosphere transparency characterising the observing sites with excellent, mean and low transparency are assumed as initial data.

Введение. Одной из важнейших задач гетерохромной фотометрии является учет атмосферной экстинкции. Эффект ширины полос при гетерохромной фотометрии звезд обусловлен, с одной стороны, зависимостью коэффициента атмосферной экстинкции от распределения энергии в спектре звезды, с другой — изменением ослабления света в зависимости от зенитного расстояния, т. е. эффектом Форбса.

В работе [9] приведены данные расчетов атмосферной экстинкции для визуальных и фотографических наблюдений, но приведенные таблицы носят иллюстративный характер и не могут быть использованы фотометристами в практической работе. Атмосферную экстинкцию в полосах системы *UBV* для звезд различных типов вычисляли многие авторы. В работе [1] исследована зависимость коэффициентов атмосферной экстинкции от нормальных показателей цвета и от избытков цвета звезд, а также рассмотрено изменение наклона бугеровских линий в зависимости от спектрального класса и класса светимости звезды. На основании наблюдательных данных в работе [3] показана сложная картина изменения коэффициента экстинкции для показателя цвета *U—B*. Методика учета атмосферной экстинкции для показателей цвета *U—B* непокрашенных звезд разработана и в работе [12]. Один из способов учета зависимости ультрафиолетовых коэффициентов экстинкции для Вильнюсской системы описан в [7]. Зависимость коэффициентов атмосферной экстинкции от спектрального класса, светимости и величины межзвездного покраснения звезды исследована в [5] для Вильнюсской системы *UPXYZVS*, систем *UBVR* и *WBVR*. Автор [5] установил, что линейная связь между коэффициентом экстинкции α и показателем цвета звезды с достаточной точностью существует только для показателей цвета среднеполосных систем, не содержащих ультрафиолетовые величины, а для коротковолновых показателей цвета любой системы коэффициенты экстинкции сложным образом зависят от спектрального класса и светимости звезды. Отметим, что в перечисленных выше работах для некоторых фотометрических систем (*UBV*, *UPXYZVS*, *UBVR*, *WBVR*) выведены формулы для определения коэффициентов экстинкции показателей цвета.

Однако при проведении гетерохромной фотометрии звезд часто необходимо знать конкретные величины коэффициентов атмосферной экстинкции. Поэтому целью данной работы было вычисление коэффициентов экстинкции для фотометрической системы UBV и системы φ фотометра, в котором приемником служит фотоумножитель с сурьяно-цезиевым фотокатодом, для звезд различных спектральных классов и светимостей и различных спектральных кривых прозрачности земной атмосферы.

Постановка задачи и исходные данные. Прозрачность земной атмосферы для зенитного расстояния z в спектральном интервале от λ_1 до λ_2 можно выразить следующим образом:

$$p_z = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) S(\lambda) [\rho_0(\lambda)]^X d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $E(\lambda)$ — распределение энергии в спектре звезды в относительных единицах; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность приемника; $\rho_0(\lambda)$ — спектральная прозрачность земной атмосферы в зените для длины волны λ ; X — воздушная масса. Прозрачность земной атмосферы в зените в полосе чувствительности $S(\lambda)$ определяем как

$$\rho_0 = \sqrt[X]{p_z}, \quad (2)$$

а соответствующее ему ослабление света земной атмосферы

$$\alpha = -2.5 \lg \rho_0. \quad (3)$$

Формулы (1) — (3) положены в основу выполненных нами расчетов. Рассмотрим подробно, какие данные взяты в качестве исходных для расчета с целью изучения эффекта ширины полос. Мы выбрали широко применяемую в настоящее время для различного рода задач фотометрическую систему UBV и систему φ фотометра, в котором приемником служит сурьяно-цезиевый фотоумножитель ФЭУ-64. В системе UBV

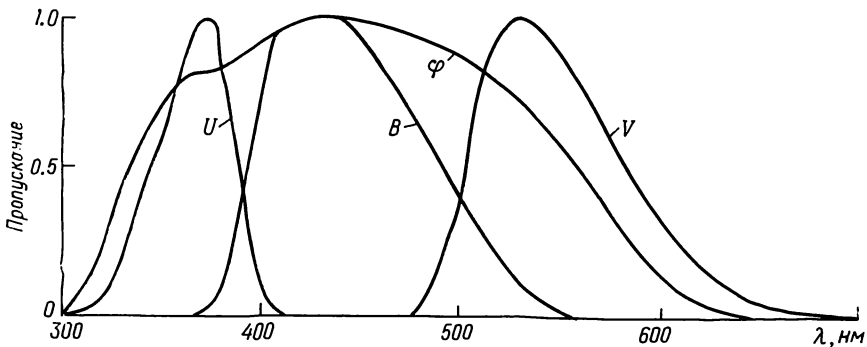


Рис. 1. Кривые реакции фотометрической системы UBV и кривая спектральной чувствительности φ сурьяно-цезиевого фотоумножителя

исследовано огромное количество рассеянных и шаровых скоплений, ассоциаций, звездных площадок и отдельных звезд. Неоднократно делались попытки уточнения кривых реакции [13, 14]. Последняя и наиболее полная попытка уточнить кривые реакции была предпринята в работе [2]. Кривые U , B , V по данным [2] и кривая φ , представляющая типичную кривую спектральной чувствительности сурьяно-цезиевого фотоумножителя, согласно [10], представлены на рис. 1.

Известно, что кривые реакции стандартной системы UBV [2], особенно для полос U и B , отличаются от практически реализуемых у нас в СССР широкополосных систем $U'B'V'$. Поскольку в настоящее время не существует единой инструментальной фотометрической системы $U'B'V'$, реализуемой на отечественных элементах (хотя рекомендации по формированию такой системы даны в [7]), целесообразно взять в качестве исходных данных кривые реакции полос стандартной системы UBV .

Далее, в качестве исходных данных для расчетов из каталога [8] были выбраны кривые распределения энергии в спектрах непокрашенных звезд, соответствующих различным спектральным классам и светимостям. Всего таких звезд оказалось 35, из них 17 звезд спектральных классов $B3-M5$ главной последовательности, 14 звезд спектральных классов $A5-M6$ III класса светимости, 3 звезды спектральных классов $G5, G8, K0$ IV класса светимости, 1 звезда $M2 I ab$.

Использованные средние кривые распределения энергии для всех

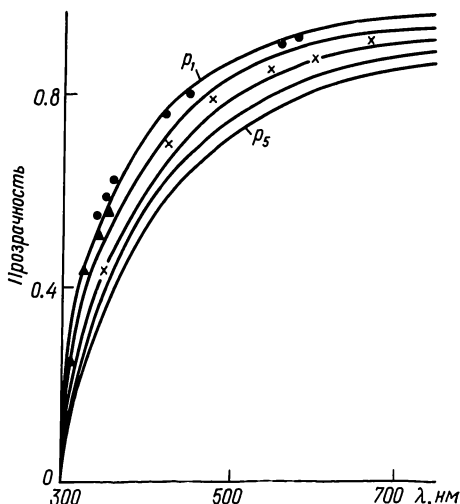


Рис. 2. Спектральная прозрачность земной атмосферы. ● — Чаупилома, Чили [15]; × — Крымская астрофизическая обсерватория [11]; ▲ — Безымянный перевал, Армения [4]

звезд редуцированы в единую систему абсолютизации и даны в «относительно абсолютной» форме, т. е. все кривые нормализованы к 100 в длине волны 550 нм. Каждая цифра дает интеграл интенсивности в интервале спектра шириной 5 нм с центром на указанной длине волны. Кривые распределения энергии представлены в виде таблиц с шагом 5 нм. Что касается точности исходных средних кривых энергии для звезд, то авторы [8] считают, что наименьшая ошибка — в области длины волны 550 нм, в области 350 нм погрешность составляет для B -звезд 2–3 % и наибольшая ошибка — для $K-M$ -звезд — 5–10 %.

Для расчетов необходимо использовать кривую прозрачности земной атмосферы для спектральной области от 300 нм до 650 нм. Нами был принят набор спектральных кривых прозрачности земной атмосферы $\rho_1-\rho_5$, представленных на рис. 2. Кривые $\rho_1-\rho_5$ охватывают область реальных изменений прозрачности в зависимости от места наблюдений. Можно считать, что кривая ρ_1 характерна для мест с наилучшей прозрачностью, ρ_3 соответствует пунктам наблюдений со средней прозрачностью, ρ_5 характеризует места с относительно низкой прозрачностью. Принятый для расчетов набор спектральных кривых прозрачности земной атмосферы позволит фотометристам использовать расчеты для конкретного места наблюдений.

Основным фактором, влияющим на изменение ослабления света в атмосфере, является воздушная масса X . В качестве исходных данных мы ограничились изменением воздушных масс от 1 до 4 с шагом 0.05, исходя из практических потребностей фотометристов. Все расчеты выполнены на ЭВМ ЕС-1030 методом численного интегрирования [6].

Обсуждение результатов. В результате выполненных расчетов получены данные для ρ_z , ρ_0 и α четырех фотометрических полос U, B, V, ϕ для звезд 35 различных спектральных подклассов и светимостей в

диапазоне воздушных масс от 1 до 4 с интервалом 0.05 для 5 спектральных кривых прозрачности атмосферы. В статье невозможно представить все полученные результаты расчетов, поэтому в табл. 1—4 и на рис. 3 проиллюстрированы данные только для избранных классов звезд, некоторых кривых прозрачности земной атмосферы и воздушных масс от 1 до 4 с интервалом 0.5.

Из табл. 1 видно, что коэффициенты атмосферной экстинкции даже в системе V различны для разных воздушных масс и для звезд с различным распределением энергии в спектре.

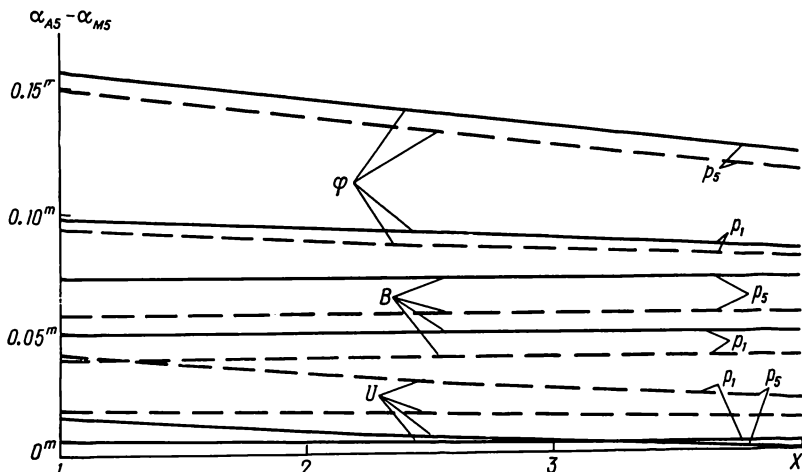


Рис. 3. Зависимость разности коэффициентов атмосферной экстинкции ($\alpha_{A5} - \alpha_{M5}$) от воздушной массы для фотометрических полос U, B, ϕ и кривых прозрачности атмосферы ρ_1 и ρ_5 . — для звезд класса светимости V ; - - - для звезд класса светимости III

Таблица 1. Атмосферная экстинкция α (в звездных величинах) для кривой прозрачности земной

Спектральный класс	Воздушная							
	U				B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
B3 V	0.7859	0.7704	0.7577	0.7470	0.4151	0.4098	0.4046	0.3994
B5 V	0.7728	0.7581	0.7459	0.7356	0.4145	0.4092	0.4039	0.3987
A0 V	0.7433	0.7302	0.7196	0.7106	0.4057	0.4006	0.3956	0.3906
A5 V	0.7438	0.7311	0.7207	0.7119	0.3998	0.3948	0.3899	0.3850
F0 V	0.7529	0.7400	0.7294	0.7205	0.3935	0.3885	0.3836	0.3787
F5 V	0.7573	0.7446	0.7340	0.7250	0.3903	0.3852	0.3803	0.3755
G0 V	0.7593	0.7471	0.7369	0.7282	0.3820	0.3771	0.3722	0.3676
G5 V	0.7616	0.7491	0.7387	0.7298	0.3783	0.3735	0.3688	0.3642
K0 V	0.7622	0.7499	0.7397	0.7311	0.3687	0.3641	0.3597	0.3553
K5 V	0.7538	0.7419	0.7321	0.7236	0.3534	0.3495	0.3457	0.3421
M0 V	0.7397	0.7293	0.7208	0.7130	0.3442	0.3404	0.3368	0.3333
M5 V	0.7300	0.7212	0.7137	0.7072	0.3326	0.3288	0.3252	0.3218
A5 III	0.7385	0.7260	0.7157	0.7072	0.4014	0.3963	0.3912	0.3863
F0 III	0.7459	0.7335	0.7233	0.7147	0.3931	0.3881	0.3832	0.3784
G5 III	0.7542	0.7425	0.7328	0.7246	0.3680	0.3633	0.3588	0.3544
K0 III	0.7463	0.7353	0.7263	0.7185	0.3596	0.3553	0.3512	0.3472
K5 III	0.7320	0.7222	0.7139	0.7068	0.3317	0.3284	0.3252	0.3221
M0 III	0.7275	0.7184	0.7106	0.7039	0.3318	0.3285	0.3253	0.3222
M5 III	0.7062	0.6992	0.6932	0.6878	0.3478	0.3434	0.3391	0.3350
M6 III	0.7000	0.6937	0.6882	0.6832	0.3646	0.3595	0.3545	0.3495
G5 IV	0.7599	0.7482	0.7328	0.7246	0.3738	0.3691	0.3588	0.3544
G8 IV	0.7595	0.7475	0.7339	0.7259	0.3676	0.3629	0.3547	0.3506
K0 IV	0.7575	0.7452	0.7350	0.7263	0.3623	0.3579	0.3536	0.3494
M2 Iab	0.7150	0.7073	0.7006	0.6946	0.3213	0.3179	0.3147	0.3116

Рассмотрим, какой вклад в величину эффекта ширины полос вносит изменение зенитного расстояния, на котором наблюдаются звезды различных спектральных классов. Для этого были определены последовательно разности $\Delta\alpha$ между коэффициентом атмосферной экстинкции α , соответствующим воздушной массе 1, и коэффициентом атмосферной экстинкции, определенным при воздушной массе 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4 для одного и того же распределения энергии в спектре звезды. Эти разности представлены в табл. 2, 3, 4 соответственно для кривых прозрачности земной атмосферы p_1, p_3, p_5 . Они незначительны в полосе V. Так при разности воздушных масс $\Delta X=3$ для кривой p_3 $\Delta\alpha$ составляет 0.001^m , для кривой p_5 $\Delta\alpha$ увеличивается до 0.002^m . Поэтому в табл. 2—4 данные $\Delta\alpha$ для полосы V не приведены. В полосе B эффект Форбса несколько больше. При точности фотоэлектрических наблюдений 0.005^m этот эффект можно не учитывать при воздушных массах $X>2$. При наблюдениях в полосах U и ϕ даже при небольших воздушных массах разности $\Delta\alpha$ значительны, и их следует учитывать при обработке наблюдательных данных, полученных в условиях средней прозрачности атмосферы p_3 . Сравнивая между собой данные табл. 2—4, можно видеть, как проявляется эффект Форбса для различных кривых прозрачности земной атмосферы. Для кривой p_1 , которая характеризует места с наилучшей прозрачностью, эти разности значительно меньше, чем для средней кривой p_3 . При наблюдениях в местах с невысокой прозрачностью, подобной p_5 , эффект Форбса весьма значителен даже при небольшом изменении воздушных масс.

Рассмотрим, как влияет изменение зенитного расстояния на разности между коэффициентами атмосферной экстинкции для различных кривых распределения энергии в спектрах звезд. Для каждой полосы были вычислены разности между коэффициентами атмосферной экстинкции, определенными по звездам A5 и M5. На рис. 3 для звезд классов светимости V и III приведены разности ($\alpha_{A5}-\alpha_{M5}$) в звезд-

атмосферы p_3

масса

V				ϕ			
1	2	3	4	1	2	3	4
0.1986	0.1982	0.1978	0.1975	0.5088	0.4767	0.4513	0.4304
0.1981	0.1977	0.1973	0.1969	0.4846	0.4562	0.4337	0.4151
0.1977	0.1973	0.1969	0.1965	0.4222	0.4032	0.3877	0.3745
0.1969	0.1965	0.1962	0.1958	0.4102	0.3920	0.3772	0.3647
0.1956	0.1952	0.1948	0.1945	0.4048	0.3856	0.3702	0.3573
0.1947	0.1943	0.1939	0.1935	0.4033	0.3835	0.3675	0.3543
0.1939	0.1935	0.1931	0.1928	0.3854	0.3671	0.3524	0.3402
0.1933	0.1929	0.1925	0.1921	0.3744	0.3572	0.3434	0.3319
0.1922	0.1918	0.1914	0.1910	0.3517	0.3368	0.3250	0.3152
0.1876	0.1872	0.1868	0.1865	0.3094	0.2996	0.2917	0.2850
0.1862	0.1859	0.1855	0.1851	0.2900	0.2822	0.2759	0.2700
0.1872	0.1868	0.1864	0.1861	0.2749	0.2681	0.2625	0.2570
0.1966	0.1963	0.1959	0.1955	0.4103	0.3922	0.3774	0.3649
0.1960	0.1956	0.1952	0.1948	0.3995	0.3817	0.3672	0.3550
0.1924	0.1920	0.1916	0.1912	0.3497	0.3351	0.3234	0.3138
0.1917	0.1913	0.1910	0.1906	0.3242	0.3134	0.3045	0.2970
0.1874	0.1872	0.1867	0.1863	0.2732	0.2677	0.2630	0.2588
0.1876	0.1872	0.1868	0.1864	0.2725	0.2671	0.2626	0.2585
0.1876	0.1872	0.1868	0.1864	0.2810	0.2744	0.2687	0.2637
0.1857	0.1853	0.1849	0.1845	0.2907	0.2828	0.2758	0.2697
0.1931	0.1928	0.1916	0.1912	0.3497	0.3351	0.3234	0.3138
0.1923	0.1919	0.1912	0.1909	0.3352	0.3228	0.3128	0.3043
0.1920	0.1916	0.1912	0.1908	0.3354	0.3226	0.3123	0.3038
0.1870	0.1866	0.1862	0.1858	0.2576	0.2533	0.2495	0.2461

Таблица 2. Эффект Форбса $\Delta\alpha$ ($1 \cdot 10^{-4}$ зв. вел.) для кривой прозрачности земной атмосферы ρ_1

Спектральный класс	Разность воздушных масс ΔX																	
	U						B						Ф					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
B3 V	32	57	85	111	136	160	15	31	47	62	78	93	88	169	245	316	382	444
B5 V	29	56	83	109	137	157	16	32	47	63	78	94	78	151	219	282	341	398
A0 V	27	52	77	100	123	145	15	30	45	60	74	89	55	105	152	195	237	275
A5 V	26	51	75	98	120	141	15	29	44	58	73	87	51	100	145	187	226	264
F0 V	26	51	75	98	120	141	15	30	44	58	73	87	55	105	151	196	236	274
F5 V	26	50	74	97	119	140	14	29	44	58	72	86	57	109	158	203	245	284
G0 V	25	49	71	93	114	135	15	29	43	57	70	84	51	102	146	188	227	264
G5 V	25	49	72	95	116	137	14	28	42	55	69	82	49	95	137	175	212	245
K0 V	25	48	71	93	114	134	13	26	39	52	64	77	43	82	108	152	182	211
K5 V	24	47	70	91	112	132	11	22	32	43	53	63	28	53	76	98	118	136
M0 V	21	43	63	83	101	120	10	21	31	41	51	60	21	42	60	78	94	109
M5 V	19	38	55	73	89	105	10	20	31	40	50	59	19	37	53	68	82	95
A5 III	26	50	74	97	118	139	15	30	45	59	74	88	52	99	144	186	225	262
F0 III	25	49	73	95	117	137	15	29	44	58	72	86	51	98	142	183	221	257
G5 III	24	46	68	86	110	129	14	27	40	53	66	78	42	80	116	148	179	207
K0 III	23	44	65	85	104	122	12	24	36	47	58	70	31	59	85	110	132	154
K5 III	21	41	61	80	98	116	10	19	33	44	53	64	14	28	41	53	64	75
M0 III	20	39	57	75	92	105	10	21	27	36	44	53	14	27	39	51	62	72
M5 III	16	31	47	61	76	90	12	24	36	48	59	70	17	34	50	65	79	92
M6 III	15	29	43	57	71	84	14	28	42	56	70	84	21	42	62	80	98	115
G5 IV	23	46	68	89	109	129	14	27	41	54	67	80	46	88	127	163	196	228
G8 IV	24	47	69	91	112	132	13	27	40	52	65	77	42	81	116	149	180	208
K0 IV	25	48	71	93	114	135	12	25	37	49	61	73	37	70	101	130	156	181
M2 Iab	17	34	51	67	82	97	9	18	26	35	43	51	11	22	32	41	50	58

Таблица 3. Эффект Форбса $\Delta\alpha$ ($1 \cdot 10^{-4}$ зв. вел.) для кривой прозрачности земной атмосферы ρ_3

Спектральный класс	Разность воздушных масс ΔX																	
	U						B						Ф					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
B3 V	82	155	221	282	338	389	26	53	79	105	131	157	171	321	455	575	684	784
B5 V	77	147	211	269	322	372	27	53	79	106	132	158	151	282	402	509	606	695
A0 V	69	131	186	237	284	327	26	51	76	101	116	151	101	190	271	345	413	477
A5 V	67	127	181	231	271	319	25	50	75	99	124	148	96	182	259	330	395	455
F0 V	68	129	184	234	281	324	25	50	75	99	124	148	112	192	273	346	413	475
F5 V	67	127	183	233	280	323	25	51	75	100	124	148	105	198	282	358	427	490
G0 V	64	122	175	224	269	311	25	49	74	98	121	144	97	183	261	330	394	452
G5 V	66	125	179	229	271	318	24	48	72	95	118	141	92	172	245	310	370	425
K0 V	65	123	177	225	270	311	22	44	66	90	112	134	79	149	201	267	318	365
K5 V	63	119	170	217	261	302	20	35	58	87	95	113	52	98	139	177	206	244
M0 V	54	104	149	191	231	267	19	38	56	74	91	109	41	78	112	141	173	200
M5 V	46	88	127	163	197	228	19	38	56	74	91	108	36	68	97	124	149	173
A5 III	66	125	179	228	272	313	26	51	76	102	126	151	95	181	268	329	394	454
F0 III	65	124	177	226	271	312	25	50	75	99	123	147	94	178	254	323	386	445
G5 III	61	117	167	214	257	296	24	47	70	92	114	136	78	146	207	263	313	359
K0 III	58	110	157	200	240	278	22	43	64	84	105	124	57	108	154	197	236	272
K5 III	51	98	141	181	218	252	17	33	50	65	81	96	29	55	80	102	124	144
M0 III	48	91	132	169	203	236	19	33	49	65	81	96	28	54	77	99	120	140
M5 III	36	70	101	130	158	184	22	44	65	87	107	128	34	66	95	123	149	173
M6 III	33	63	92	118	144	168	25	51	76	101	126	151	41	79	115	149	180	210
G5 IV	61	117	168	215	258	299	24	47	71	93	116	138	84	159	226	287	342	393
G8 IV	63	120	172	220	264	305	24	47	71	92	113	135	78	147	208	264	315	361
K0 IV	65	123	177	225	270	312	22	44	66	87	108	129	68	128	182	231	275	316
M2 Iab	40	77	112	144	175	204	17	34	50	66	82	97	23	43	63	81	99	115

ных величинах для фотометрических полос U , B , ϕ и кривых прозрачности земной атмосферы p_1 и p_5 в зависимости от воздушных масс.

Видно, что эти разности значительно увеличиваются с ухудшением прозрачности атмосферы, а также весьма отличаются для звезд классов светимости V и III (особенно для полос U и B).

Таблица 4. Эффект Форбса $\Delta\lambda$ ($1 \cdot 10^{-4}$ зв. вел.) для кривой прозрачности земной атмосферы p_5

Спектральный класс	Разность воздушных масс ΔX																	
	U						B						ϕ					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
V3 V	154	289	410	520	619	710	32	65	97	129	160	191	260	478	664	826	968	1096
V5 V	147	278	394	499	594	681	33	65	98	130	161	193	226	416	579	722	858	962
A0 V	131	247	349	442	525	601	31	61	92	122	152	182	145	269	377	474	560	640
A5 V	128	242	342	433	515	590	31	61	91	121	150	179	138	256	359	451	533	608
F0 V	132	244	346	439	525	601	31	61	91	121	151	180	147	271	378	474	553	636
F5 V	128	242	345	437	522	599	31	61	91	121	151	180	152	281	394	491	579	658
G0 V	124	234	333	423	506	582	30	59	89	118	146	174	140	259	372	452	533	605
G5 V	127	239	340	432	516	574	30	59	88	116	154	171	131	242	338	422	497	564
K0 V	123	232	331	421	504	580	28	56	83	110	136	162	111	205	287	359	423	481
K5 V	120	226	323	410	491	565	24	48	71	93	115	137	71	132	186	234	277	327
M0 V	107	202	289	369	442	510	23	46	68	90	111	132	57	106	150	189	226	259
M5 V	92	174	250	319	384	444	23	46	68	89	110	131	49	91	129	164	195	224
A5 III	126	237	335	424	504	577	31	62	93	123	153	183	137	254	357	399	531	607
F0 III	125	135	334	424	505	579	31	61	91	120	149	178	135	251	351	440	521	594
G5 III	118	223	318	404	483	555	28	57	84	111	138	164	109	201	281	352	416	473
K0 III	110	208	296	376	450	518	26	52	77	102	126	150	79	147	207	261	309	354
K5 III	100	191	274	349	419	484	21	41	61	80	99	117	36	73	104	133	160	185
M0 III	95	180	257	328	394	456	21	41	60	80	99	117	36	70	100	128	154	179
M5 III	74	142	205	263	318	370	27	53	79	105	130	154	45	86	123	158	191	221
G6 III	68	131	189	244	296	345	31	62	92	122	152	181	54	104	150	192	232	268
G5 IV	119	225	322	390	492	567	29	58	86	113	140	167	120	222	310	382	459	522
G8 IV	121	230	327	416	498	573	28	56	83	110	137	163	109	202	283	354	418	475
K0 IV	125	235	333	423	505	581	27	54	80	106	131	156	95	176	246	307	363	413
M2 Iab	82	157	227	292	352	409	21	41	61	80	99	117	30	57	82	105	127	148

Для всех рассмотренных вариантов ошибка определения коэффициента прозрачности атмосферы составила величину, меньшую 0.005^m .

Выполненные спектральные расчеты гетерохромных коэффициентов атмосферной экстинкции для различных кривых распределения энергии в спектрах звезд могут быть использованы фотометристами в практической работе для оценки эффекта ширины полос при наблюдениях в широких фотометрических полосах.

В заключение авторы выражают благодарность Э. И. Терезу за полезное обсуждение работы и А. Б. Болотову за помощь в вычислениях.

1. Ажусенис А., Страйжис В. Уточнение кривых реакции и параметров системы U, B, V . II Колор-индексы.— Бюл. Вильн. астрон. обсерватории, 1966, № 17, с. 3—23.
2. Ажусенис А., Страйжис В. Уточнение кривых реакции и параметров системы UBV . Сводка результатов.— Астрон. журн., 1969, 46, с. 402—411.
3. Ажусенис А., Страйжис В., Суджос И. Уточнение кривых реакции и параметров системы U, B, V, V . Зависимость наклона линий покраснения от спектрального класса по данным наблюдений.— Бюл. Вильн. астрон. обсерватории, 1966, № 18, с. 34—67.
4. Выборная Т. В., Пантелеев С. К., Терез Э. И. Исследование изменений атмосферной экстинкции в УФ-области спектра.— Астрон. циркуляр, 1978, № 1013, с. 3—5.
5. Эданавичюс К. Об учете зависимости коэффициентов атмосферной экстинкции от спектрального класса, светимости и межзвездного покраснения в многоцветной фотометрии.— Бюл. Вильн. астрон. обсерватории, 1975, № 41, с. 3—29.
6. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране.— М.: Мир, 1977.—584 с.

7. *Страйжис В.* Многоцветная фотометрия звезд.— Вильнюс: Мокслас, 1977.—310 с.
8. *Страйжис В., Свидерскене З.* Распределение энергии в спектрах звезд различных спектральных классов и светимостей.— Бюл. Вильн. астрон. обсерватории, 1972, № 35, с. 3—92.
9. *Сытинская Н. Н.* Об учете атмосферного поглощения при абсолютной фотометрии небесных тел.— Астрон. журн., 1944, 21, с. 230—240.
10. *Терез Э. И.* Абсолютные спектральные характеристики фотоумножителей.— Изв. Крым. астрофиз. обсерватории, 1972, 46, с. 144—154.
11. *Терез Э. И.* К вопросу об атмосферной экстинкции в Крыму.— Астрон. циркуляр, 1978, № 1001, с. 6—7.
12. *Cutierrez-Moreno A., Moreno H., Stock J., Torrez C., Wroblewski H.* A system of photometric standards.— Publ. Dep. Astr. Univ. Chile, 1966, N 1, p. 1—17.
13. *Johnson H. L.* Interstellar extinction in the Galaxy.— *Astrophys. J.*, 1965, 141, p. 923—942.
14. *Matthews T. A., Sandage A. K.* Optical identification of 3C48, 3C196 and 3C286 with stellar objects.— *Astrophys. J.*, 1963, 138, p. 30—56.
15. *Stock J.* The atmospheric extinction in photoelectric photometry.— In: *Vistas Astron.*, 1969, 11, p. 127-146.

Симферопольский государственный университет
им. М. В. Фрунзе

Поступила в редакцию
16.07.1984

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 521.182.2

В. К. Тарадий, М. Л. Цесис

ВЫЧИСЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.

(Препринт ИТФ—84—60Р)

Изложена методика построения широкого класса алгоритмов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений произвольного порядка. Методика основана на представлении исходных уравнений в интегральной форме и последующей замене подинтегральной функции интерполяционным полиномом.

При построении конкретного алгоритма текущему шагу интегрирования ставится в соответствие некоторая последовательность значений независимой переменной t , монотонно изменяющаяся в направлении интегрирования. Процесс нахождения решения на шаге условно разделяется на два этапа. На первом этапе вычисляются оценки правых частей дифференциальных уравнений в тех точках последовательности $\{t_i\}$, где они не определены в ходе вычислений на предыдущих шагах. Эти оценки находятся последовательно в одной или нескольких очередных точках с помощью явной или неявной процедуры. На втором этапе полученные оценки используются для вычисления значений решения и его производных в конце шага.

Конкретный алгоритм характеризуется расположением точек последовательности относительно текущего шага интегрирования, процедурами, используемыми для получения оценок правых частей и формой задания интерполяционных полиномов, аппроксимирующих правые части дифференциальных уравнений.

Создание методики обеспечило возможность единого подхода к алгоритмизации методов Рунге-Кутты, Адамса, а также гибридных методов. Кроме того, указанная методика может быть использована для анализа структуры уже созданных алгоритмов, например, широко используемого для задач определения орбит алгоритма Эверхарта. Разрабатываемые по предлагаемой в работе схеме алгоритмы обладают важной особенностью для решения задач космической геодинамики — интерполяция на момент наблюдения производится с минимальными вычислительными затратами и без помех процессу интегрирования.

В работе приведены практические примеры использования разработанной методики при построении алгоритмов, основанных на методах Рунге-Кутты и Адамса.