

ВЫЧИСЛЕНИЕ АЗИМУТА И ПОПРАВКИ ХРОНОМЕТРА В СПОСОБЕ КРЫЖАНОВСКОГО ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ, НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО МЕРИДИАНА

С продвижением астрономо-геодезической сети СССР на север были исследованы различные азимутальные методы определения долготы в Заполярье (В. Я. Струве, Д. Д. Геденова, Н. Д. Павлова, Струве—Павлова, В. К. Деллена), а также «метод прохождений» (см. [1, 2, 12, 16, 19] и др.). Но многие из них были «абсолютными», т. е. связанными с отчетами по горизонтальному кругу и с наблюдениями Полярной, и не могли превзойти и заменить «относительный» метод Деллена, рекомендованный Инструкцией [10] для широт более 70° в качестве основного. В нем (как и в способе Талькотта) отсчеты по кругу не производятся.

Однако применение метода Деллена в высоких широтах связано с рядом трудностей, а именно:

а) он основан на наблюдениях Полярной и не может быть использован в Антарктиде, где Полярная не видна.

б) в широтах более 70° Полярную необходимо наблюдать на малых зенитных расстояниях ($z < 20^\circ$), чему мешает накладной уровень, который приходится снимать;

в) Полярная и южные звезды наблюдаются по разной методике (Полярная — с отчетами микрометра, а южные звезды — с регистрацией контактов), что осложняет наблюдения и вызывает разные лично-инструментальные ошибки.

Поэтому важное значение в развитии астроопределений в Заполярье имел разработанный А. А. Крыжановским и видоизмененный для универсального инструмента способ Д. Д. Геденова, в котором не требуются ни наблюдения Полярной, ни отсчеты по горизонтальному кругу [13]. Он значительно проще способа Д. Д. Геденова, так как основан на наблюдениях не четырех, а двух звезд (северной и южной) вблизи меридиана, что облегчает подбор звезд, наблюдения и их обработку. Кроме того, в нем сокращается до 4—5 мин время, в течение которого инструмент должен быть неподвижен по азимуту. В 1977 г. способ Крыжановского был испытан в Антарктиде на широте $80^\circ 30'$ и дал хорошие результаты [3, 4, 6]. Он также лег в основу методов определения азимутальной лично-инструментальной разности (АЛИР) и определения геодезического азимута по наблюдениям звезд вблизи меридиана, разработанных в ЦНИИГАиК В. Г. Львовым [14, 15] на основе идей А. Б. Маринбаха [16] и В. А. Беляева.

В 1972 г. Ф. Д. Заблоцкий с помощью ЭВМ «М-222», используя 532 южных звезды (238 из «АЕ», 28 из «КГЗ-2» и 266 из «ГС» Босса), составил рабочие эфемериды пар способа Кры-

жаповского для Антарктиды (для широт — $65-80^\circ$), выдерживая требования: а) $m \leq 4,5$; б) $10^\circ > \delta > -90^\circ$; в) $15^\circ < z < 75^\circ$; г) $z_S + z_N < 120^\circ$ [6]. В эфемеридах также приведены коэффициенты, необходимые для вычисления поправки хронометра и азимута [7]. Эти эфемериды использовались на производстве [4, 9]. Ряд вспомогательных таблиц для этого способа составил В. В. Киричук [11]. Наблюдения могут осуществляться в двух вариантах, что зависит от разности прямых восхождений звезд и скоростей их движения по азимуту (рис. 1, а, б):

- а) σ_N^L, σ_S^R (в азимуте a_1), σ_S^L, σ_N^R (в азимуте a_2);
 б) σ_N^L, σ_S^R (в азимуте a_1), σ_N^R, σ_S^L (в азимуте a_2).

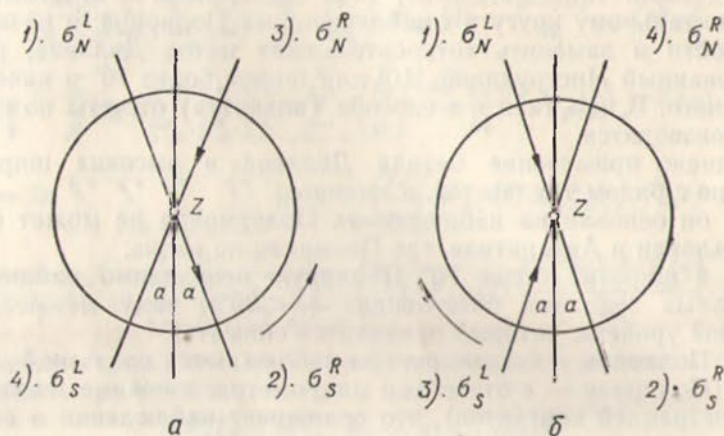


Рис. 1. Схемы наблюдений в способе Крыжановского.

Эти наблюдения позволяют составить четыре уравнения с тремя неизвестными — средним азимутом инструмента a_m , поправкой хронометра u и коллимационной ошибкой c . Например, для программы «а» уравнения будут такими:

$$\alpha'_N + \delta\alpha_N = T_N^1 + \text{попр.} + u + A_N a_1 + C_N c; \quad (1)$$

$$\alpha'_S + \delta\alpha_S = T_S^2 + \text{,,} + u + A_S a_1 - C_S c; \quad (2)$$

$$\alpha'_S + \delta\alpha_S = T_S^3 + \text{,,} + u + A_S a_2 + C_S c; \quad (3)$$

$$\alpha'_N + \delta\alpha_N = T_N^4 + \text{,,} + u + A_N a_2 - C_N c. \quad (4)$$

Здесь $\delta\alpha_N$ и $\delta\alpha_S$ поправки за суточную аберрацию, поправки, вводимые в момент наблюдений T , включают $B\delta + ШК + МХ + \omega\tau$, т. е. поправки за наклонность горизонтальной оси, ширину контакта, мертвый ход винта и ход хронометра; A , B и C — коэффициенты Майера

$$A = \sin z \sec \delta, \quad B = \cos z \sec \delta, \quad C = \sec \delta, \quad (5)$$

a_1 и a_2 — азимуты вертикалов наблюдений.

Для вычисления a_m и u из уравнений (1)–(4) проще всего образовать средние уравнения из первого и четвертого, второго и третьего наблюдений [13]. Тогда получим:

$$u + A_N a_m = \alpha_N - T_N^{14} = l_N^{14}, \quad (6)$$

$$u + A_S a_m + \alpha_S - T_S^{23} = l_S^{23}. \quad (7)$$

Отсюда находим:

$$u = \frac{l_S^{23} A_N - l_N^{14} A_S}{A_N - A_S} = l_S - \frac{A_S}{A_N - A_S} \times \\ \times (l_N - l_S) = l_N - \frac{A_N}{A_N - A_S} (l_N - l_S); \quad (8)$$

$$a_m = \frac{l_N - l_S}{A_N - A_S} = \frac{(l_N - l_S) P}{A_S}. \quad (9)$$

При хорошей ориентировке инструмента ($a < 2,5' = 10^6$) коэффициенты $\frac{A_S}{A_N - A_S} = A$ и $\frac{A_N}{A_N - A_S} = A + 1$ можно вычислять с четырьмя знаками по таблицам из [2, 11], а при $a > 2,5' = 10^6$ — по формулам

$$A = \frac{\cos \delta_S \sin (\varphi - \delta_S)}{\cos \varphi \sin (\delta_N + \delta_S)}, \quad (10)$$

$$A + 1 = \frac{\cos \delta_S \sin (\delta_N - \varphi)}{\cos \varphi \sin (\delta_N + \delta_S)}. \quad (11)$$

Аналогично этому, образовав полуразности уравнений (4)–(1) и (3)–(2), можно получить уравнения [13]:

$$A_N \frac{(a_2 - a_1)}{2} - C_N c = \frac{\Delta T_N}{2} = \Delta l_N; \quad (12)$$

$$A_S \frac{(a_2 - a_1)}{2} + C_S c = \frac{\Delta T_S}{2} = \Delta l_S. \quad (13)$$

Отсюда

$$\frac{\Delta a}{2} = \frac{\Delta l_N C_S - \Delta l_S C_N}{A_N C_S - A_S C_N}, \quad (14) \quad c = \frac{A_N \Delta l_S - A_S \Delta l_N}{A_N C_S - A_S C_N}. \quad (15)$$

Выгоднейшие условия наблюдений пар звезд в общем вертикале детально исследованы А. П. Колупаевым [12] и С. С. Ураловым [18]. Общая формула

$$m_u = m_l \sqrt{0,5N} \operatorname{seca} \sec \varphi, \quad (16)$$

где

$$N = [\sin^2 z_N + \sin^2 z_S] \operatorname{cosec}^2 (z_N + z_S) \quad (17)$$

служит и для данного способа.

А. А. Крыжановский подбирает звезды в пары так, чтобы $z_N + z_S \leq 90^\circ$ (при этом $N < 1$) и наблюдал их симметрично относительно меридиана, что облегчает обработку наблюдений (исключается поправка за ускорение).

Но это связано с некоторыми неудобствами, поскольку:

- интервалы ΔT_{12} , ΔT_{23} и ΔT_{34} получаются неодинаковыми, что затрудняет наблюдения, а иногда делает их невозможными;
- число пар ярких северных и южных звезд, кульминирующих почти одновременно, невелико;

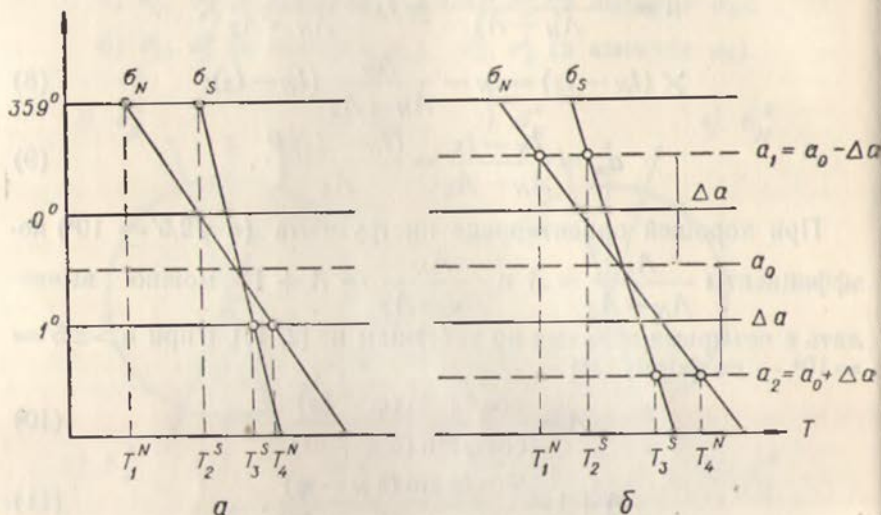


Рис. 2. Схемы симметричных и несимметричных наблюдений.

в) нельзя несколько раз наблюдать одну и ту же северную звезду (подбирать северные звезды всегда труднее).

Эти затруднения можно устранить. В 1972 г. В. В. Киричук [11] получил формулы для обработки в способе Крыжановского наблюдений, несимметричных относительно меридиана, при азимутах до 10° . Но он, как и Ф. Д. Заблоцкий [8], вычислял a_m и u по методу приближений.

Выгоднее всего наблюдать звезды σ_S и σ_N в двух азимутах, симметричных относительно не меридиана (рис. 2, а), а вертикала a , который они проходят одновременно (рис. 2, б).

При этом мы достигаем равенства интервалов времени $\Delta T_{12} = \Delta T_{34}$ и делаем программу наблюдений более равномерной и удобной. Такая программа, кроме того, позволяет сочетать попарно северную звезду с несколькими южными, что увеличивает число пар и производительность способа.

Покажем, как для осуществления такой программы определить азимут a_0 вертикала, который обе звезды проходят одновременно, и момент T_0 этого прохождения. Если считать азимут a положительным к востоку, то очевидно:

$$a_0 = 0^\circ + \frac{(T_0 - \alpha_N \pm 12^h)}{A_N}; \quad (18) \quad a_0 = 0^\circ + \frac{(T_0 - \alpha_S)}{A_S}, \quad (19)$$

где $A_N = \frac{dt_N}{da}$ и $A_S = \frac{dt_S}{da}$ — азимутальные коэффициенты звезд (5). Поэтому

$$\frac{a_0 A_N}{a_0 A_S} = \frac{(T_0 - \alpha_N \pm 12^h)}{(T_0 - \alpha_S)}. \quad (20)$$

Отсюда:

$$T_0 = \alpha_S + \frac{A_S (\alpha_N - \alpha_S) (12^h)}{A_N - A_S}; \quad (21)$$

$$a_0 = \frac{T_0 - \alpha_S}{A_S} = \frac{\alpha_S - \alpha_N \pm 12^h}{A_N - A_S} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta A}. \quad (22)$$

Но при несимметричных к меридиану наблюдениях нужно учитывать ускорение звезд по азимуту. Используем для этого формулы, полученные А. В. Буткевичем в 1948 г. [1], для вычисления поправки хронометра по азимутам звезд при $a < 10^\circ$

$$\lg t_S^s = \lg \frac{a_S^* A_S}{15} + K_S \sigma_{a_S}, \quad (23)$$

где

$$K_S = A_S^2 + 3B_S \cos \varphi - 1, \quad (24) \quad \sigma_a = \frac{\mu a^2}{6 \rho^h}. \quad (25)$$

В нелогарифмическом виде получим:

$$t_S^s = \frac{a_S^* A_S}{15} + \frac{\bar{K}_S a_S^{*3}}{90 \rho^2} + \dots; \quad (26)$$

$$t_N^s = \frac{a_N^* A_N}{15} + \frac{\bar{K}_N a_N^{*3}}{90 \rho^2} + \dots, \quad (27)$$

где

$$\bar{K}_S = B_S^3 + 3A_S B_S \cos \varphi - A_S, \quad (28)$$

$$\bar{K}_N = A_N^3 - 3A_N B_N \cos \varphi - A_N. \quad (29)$$

Тогда основные уравнения (1) — (4) примут вид:

$$u + A_N a_1 + C_N c = l'_N - \frac{a_1^3}{90 \rho^2} \bar{K}_N, \quad (30)$$

$$u + A_S a_1 - C_S c = l_S^2 - \frac{a_1^3}{90 \rho^2} \bar{K}_S, \quad (31)$$

$$u + A_S a_2 + C_S c = l_S^3 - \frac{a_2^3}{90 \rho^2} \bar{K}_S, \quad (32)$$

$$u + A_N a_2 - C_N c = l_N^4 - \frac{a_2^3}{90 \rho^2} \bar{K}_N. \quad (33)$$

Как видно, здесь поправки за ускорение вида $\sigma_a K$ отнесены к свободным членам, причем величины $\sigma_a^S = \frac{a^{*3}}{90\rho^{*2}}$ могут быть с достаточной точностью получены из табл. 1 по эфемеридным азимутам звезд. Значения $K_S = A_S K_S$ приводятся в табл. 2. Дальнейшее решение уравнений производится так, как описано выше. Поясним вычисление рабочих эфемерид звезд и обработку наблюдений.

Таблица 1. Натуральные поправки малых углов $\sigma_a^S = \frac{a^{*3}}{90\rho^{*2}}$

a	σ_a	a	σ_a	a	σ_a	a	σ_a	a	σ_a	a	σ_a
0° 00'	0,0000 ^S	0° 30'	0,0015 ^S	1° 00'	0,0122 ^S	1° 30'	0,0411 ^S	2° 00'	0,0975 ^S	2° 30'	0,190 ^S
1	0	31	17	1	128	31	425	01	999	31	194
2	0	32	18	2	134	32	439	02	1024	32	196
3	0	33	20	3	141	33	454	03	1050	33	202
4	0	34	22	4	148	34	469	04	1076	34	206
5	0	35	24	5	155	35	484	05	1102	35	210
6	0	36	26	6	162	36	499	06	1128	36	214
7	0	37	29	7	170	37	515	07	1156	37	219
8	0	38	31	8	177	38	531	08	1183	38	223
9	0	39	33	9	185	39	547	09	1211	39	227
0° 10'	0,0000	0° 40'	0,0036	1° 10'	0,0193	1° 40'	0,0564	2° 10'	0,1239	2° 40'	0,232
11	1	41	39	11	202	41	581	11	1268	41	236
12	1	42	42	12	211	42	599	12	1297	42	241
13	1	43	45	13	219	43	616	13	1327	43	245
14	1	44	48	14	229	44	635	14	1357	44	249
15	2	45	51	15	238	45	653	15	1388	45	254
16	2	46	55	16	248	46	672	16	1419	46	259
17	3	47	59	17	258	47	691	17	1451	47	264
18	3	48	62	18	268	48	711	18	1488	48	268
19	4	49	66	19	278	49	731	19	1515	49	273
0° 20'	0,0004	0° 50'	0,0071	1° 20'	0,0289	1° 50'	0,0751	2° 20'	0,1548	2° 50'	0,278
21	5	51	75	21	300	51	771	21	1581	51	283
22	6	52	79	22	311	52	793	22	1615	52	288
23	7	53	84	23	323	53	814	23	1650	53	292
24	8	54	89	24	334	54	836	24	1684	54	297
25	9	55	94	25	346	55	853	25	1720	55	302
26	10	56	99	26	359	56	881	26	1756	56	307
27	11	57	104	27	371	57	903	27	1792	57	312
28	12	58	110	28	384	58	927	28	1829	58	318
29	14	59	116	29	398	59	951	29	1867	59	323
0° 30'	0,0015 ^S	1° 00'	0,0122 ^S	1° 30'	0,0411 ^S	2° 00'	0,0975 ^S	2° 30'	0,1904 ^S	3° 00'	0,328 ^S

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты $K_S = A_S^3 + 3A_S B_S \cos \varphi - A_S$

φ	56°	58°	60°	62°	64°	66°	68°	70°	72	74°	76°
z_S											
16°	0,4441	4427	4409	4388	4362	4324	4275	4210	4122	4007	3884
18	0,4620	4583	4541	4495	4439	4375	4297	4201	4082	3931	3747
20	0,4765	4703	4638	4566	4486	4393	4290	4166	4019	3842	3629
22	0,4882	4799	4708	4614	4510	4393	4262	4116	3945	3745	3512
24	0,4972	4868	4757	4639	4512	4373	4220	4050	3860	3640	3390
26	0,5047	4921	4733	4652	4502	4344	4171	3981	3771	3538	3275
28	0,5104	4957	4804	4647	4484	4301	4110	3905	3680	3430	3156
30°	0,5149	4981	4808	4632	4448	4253	4044	3824	3585	3326	3041
32	0,5184	4997	4806	4610	4408	4198	3978	3742	3493	3223	2934
34	0,5208	5003	4792	4581	4363	4138	3904	3660	3398	3122	2828
36	0,5226	5001	4775	4546	4314	4074	3829	3575	3308	3023	2726
38	0,5238	4996	4752	4510	4262	4011	3753	3489	3216	2929	2623
40°	0,5244	4984	4726	4468	4208	3944	3678	3465	3124	2884	2535
42	0,5242	4967	4692	4421	4149	3875	3598	3319	3032	2739	2439
44	0,5242	4948	4659	4374	4091	3807	3523	3236	2946	2649	2349
46	0,5237	4927	4623	4325	4029	3737	3445	3154	2859	2562	2261
48	0,5226	4902	4582	4273	3968	3665	3367	3070	2774	2474	2175
50°	0,5216	4873	4541	4219	3902	3592	3289	2987	2687	2387	2093

Пример 1. Подготовка рабочих эфемерид.

Пункт Л. $\varphi_0 = 49^\circ 50'$. Звезды N 98 и S 377 по «АЕ».

N	98	m_N	4,7 ^m	a_N	3 ^h 47,9 ^m	δ_N	71°16'	sec δ_N	3,11
S	377	m_S	2,8 ^m	a_S	15 ^h 43,1 ^m	δ_S	6°30'	sec δ_S	1,01
φ_0	49°50'			Δa	-4,8 ^m	sin z_S	0,69	t'_N	10,7 ^m
δ_N	71°16'	δ_S	6°30'			sin z_N	0,86	t'_S	2,8 ^m
Σ	121°06'	z_S	43°20'	A_N	2,66	$A_N - A_S$	0,97	$T_0 - d_S$	1,7 ^m
z_N	58°54'			A_S	0,69			T_0	15 ^h 41,4 ^m

$$a_0 = \frac{-4,8^m}{4(2,66 - 0,69)} = -\frac{1^\circ,2}{1,97} \cong$$

$$\cong -0,6^\circ, T_0 = 15^h 43,1^m - 1,7^m = 15^h 41,4^m.$$

Принимаем $a_0 = -0,5^\circ$ и $\Delta a = \pm 1^\circ$, т. е. $a_1 = -1,5^\circ$ и $a_2 = +0,5^\circ$. $t'_N = (\text{для } 2^\circ) = 8^m 2,66 \pm 21,4^m$, $t'_S = (\text{для } 2^\circ) = 8^m 0,69 = 5,5^m$.

Моменты наблюдений будут равны:

- 1) для $a_1 = 178,5^\circ$ $T_{N_1} = 15^h 30,7^m$, $T_{S_2} = 15^h 38,6^m$;
- 2) для $a_2 = 180,5^\circ$ $T_{S_3} = 15^h 44,2^m$, $T_{N_4} = 15^h 52,1^m$.

Пример 2. Обработка наблюдений.

а. Вычисление поправок за ускорение. 13—14. 05. 1977 г. Пункт № 6: N 98, S 377.

α_1	$2^{\text{мм}}$	$\frac{1}{3}$ ($\alpha_1 + \alpha_2$)	$0,049^s$			δ_N	$71^{\circ}16'$
α_{21}	$0,008^s$	\bar{K}_N	$7,99$	\bar{K}_S	$0,62$	δ_S	$6\ 30$
α_2	$0^{\circ}00'$	Δ_N	$0,391$	Δ_S	$0,030$	z_N	$58\ 54$
α_{22}	$0,000^s$					z_S	$43^{\circ}20'$

6. Вычисление азимута и поправки хронометра.

Звезда	N 98		S 377		
$\alpha_N \pm 12^h$	$15^h47^m54,188^s$	α_S	$15^h43^m10,681^s$	A_S	$0,6907$
$\delta\alpha_N$	$0,044$	$-\delta\alpha_S$	$-0,014$	A_N	$2,6660$
$-\Delta_N$	$-0,391$	$-\Delta_S$	$-0,030$	$A_N - A_S$	$1,9753$
-7_N^{14}	$-15\ 36\ 17,202$	-7_S^{23}	$-15\ 39\ 29,239$	Δl	$7^m55,341^s$
l_N^{14}	$11^m36,639^s$	l_S^{23}	$3^m41,298^s$	Δl	$475,341^s$
$A+1$	$1,3496$	A	$0,3496$	a_m	$240,643^s$
$(A+1)\Delta l$	$-10\ 41,585$	$-A\Delta l$	$-2\ 46,344$	a_m	$1^{\circ}00'09,65''$
u	$+54,954^s$	u	$+54,954^s$		

В табл. 1 приведены натуральные поправки малых углов в единицах времени, а в табл. 2 — коэффициенты $\bar{K}_S = A_S^3 + 3A_S B_S \cos \varphi - A_S$ для южных звезд. Если включить в программу наблюдений земной предмет с отсчетами горизонтального круга, то можно определить его азимут A_Δ .

Аналогичную методику вычислений можно применять при определениях АЛИР и геодезического азимута по наблюдениям звезд вблизи меридиана (при $\alpha < 10^\circ$).

Таким образом, метод Крыжановского и его описанная разновидность могут с успехом применяться при точных астроопределениях в трудных условиях при недостатке ярких звезд в Заполярье и особенно в Антарктиде.

Список литературы: 1. Буткевич А. В. Новые методы вычисления поправки хронометра по азимутам звезд. — Вестник ВИА, 1948, № 53. 2. Буткевич А. В. Упрощение вычислений при определении поправки хронометра по способу В. К. Деллена. — Астроном. журн., 1955, т. 32, вып. 5. 3. Буткевич А. В., Заблоцкий Ф. Д. О способах совместного определения координат в Антарктиде. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1977, вып. 26. 4. Вайцекян В. И. Об астрономических определениях в Антарктиде. — Реф. сб. Серия геодезическая. ЦНИИГАиК. — М., 1972, № 18. 5. Дьяков Б. Н. Исследование точных способов астрономических определений в Заполярье. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1974. 6. Заблоцкий Ф. Д. Применение ЭВМ для подбора пар звезд и вычисления их рабочих эфемерид. — Материалы Всесоюзного совещания по использованию электронно-вычислительной техники для решения различных геодезических задач. ОНТИ ЦНИИГАиК. М., 1973. 7. Заблоцкий Ф. Д. Из опыта составления эфеме-