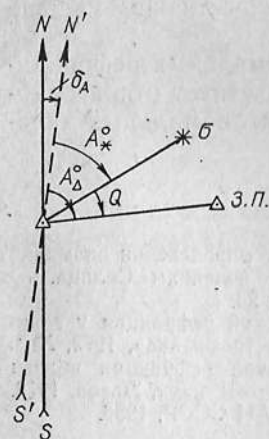


А. В. БУТКЕВИЧ, Ф. Д. ЗАБЛОЦКИИ

О СПОСОБАХ СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ КООРДИНАТ В АНТАРКТИДЕ

Обширные геологические, гляциологические, аэрофотосъемочные и другие исследования, проводимые в Антарктиде, требуют определения координат многих пунктов с точностью, соответствующей точности пунктов III, IV класса по «Инструкции» 1948 г. [4]. Как правило, для этого используют способ Сомнера, основанный на измерении зенитных расстояний ярких звезд в различных азимутах [7, 9]. Он является наиболее универсальным и гибким из всех методов полного определения координат [4]. Целесообразность использования способа Сомнера в Антарктиде заключается, в первую очередь, в том, что он позволяет в условиях полярного дня наблюдать яркие звезды практически в любых азимутах (то есть не связан с плоскостями меридиана или I-го вертикала), что очень важно в условиях кратковременной видимости. Однако применение этого способа требует наличия инструмента с точно разделенным вертикальным кругом. К тому

же на результаты измерений зенитных расстояний существенное влияние оказывает рефракция и ее аномалии (которые в Антарктиде слабо изучены), гнутые трубы и другие ошибки, связанные с отсчитыванием вертикального круга [2, 5].



Определение азимута.

В высоких широтах из-за пологого видимого суточного движения светил азимутальные способы предпочтительнее зенитальных. Согласно классификации С. С. Уралова [10], существует 7 азимутальных методов совместных определений. Но 6 из них основаны на наблюдениях звезд в ограниченной части неба (на равных высотах, в определенных вертикалах и т. д.), то есть менее гибки, чем способ Сомнера. Только метод «совместного определения координат и азимута из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях» так же универсален и гибок, как способ Сомнера. Для краткости будем называть его «общим азимутальным способом»*. Его идея заключается в измерении при КП и КЛ горизонтальных углов

между земным предметом и светилами (с отсчетами хронометра). Исходной в этом методе является известная формула

$$\operatorname{ctg} A = \sin \varphi \operatorname{ctg} t - \operatorname{tg} \delta \cos \varphi \operatorname{cosec} t. \quad (1)$$

После дифференцирования ее по переменным φ , t , A и преобразования получают [10]

$$dA = \sin A \operatorname{ctg} z d\varphi + \frac{\sin A \cos q}{\sin t} dt, \quad (2)$$

где

$$\sin q = \frac{\cos \varphi \sin A}{\cos \delta}. \quad (3)$$

На основе формулы (2) составляют уравнения погрешностей.

В этом способе определяют поправки $\delta A_{\Delta}^{\circ}$, $\delta \varphi^{\circ}$, $\delta \lambda^{\circ}$ к «счислимым» (приближенным) значениям A_{Δ}° , φ° и λ° , причем φ° и λ° снимают с топографической карты, а приближенный азимут A_{Δ}° отсчитывают по горизонтальному кругу при наведении трубы на земной предмет (при приближенной установке нулевого диаметра, то есть линии $N'S'$ на рисунке, в меридиане).

В выражении (2) часто переходят от dt к $d\lambda$. Эта связь вытекает из формулы

$$t = s - \alpha = S + \lambda^{\circ} - \alpha = T + U + \lambda^{\circ} - \alpha, \quad (4)$$

* Этот метод следовало бы называть «способом Н. Родзевича», то есть по имени русского моряка, предложившего его в 1904 г. [8].

где U — поправка хронометра относительно гринического звездного времени, определенная из приема радиосигналов и перенесенная с помощью хода на момент наблюдений.

Окончательное уравниваемое значение азимута A_{Δ} земного предмета выражается в виде

$$A_{\Delta}^{\text{изм}} + v_A = A_{\Delta}^{\circ} + \delta A = A_{*}^{\circ} + Q + \delta A, \quad (5)$$

где v_A — поправка из уравнивания, $A_{\Delta}^{\circ} = A_{*}^{\circ} + Q$ — измеренное значение, δA — постоянная поправка (место севера).

Но, с другой стороны,

$$A_{*} = f(\varphi^{\circ} + d\varphi^{\circ}; \lambda^{\circ} + d\lambda^{\circ}) = f(\varphi^{\circ}, \lambda^{\circ}) + \left(\frac{df}{d\varphi^{\circ}}\right) d\varphi^{\circ} + \left(\frac{df}{d\lambda^{\circ}}\right) d\lambda^{\circ} + \dots, \quad (6)$$

или
$$A_{\Delta}^{\text{изм}} + v_A = A_{*}^{\circ} + Q + \delta A + b\delta\varphi^{\circ} + c\delta\lambda^{\circ}, \quad (7)$$

где A_{*}° азимут звезды, вычисленный с приближенными координатами $\varphi^{\circ}, \lambda^{\circ}$.

Поэтому уравнение погрешностей (7) принимает вид

$$\delta A + b_i \delta\varphi^{\circ} + c_i \delta\lambda^{\circ} + l_i = v_{A_i}, \quad (8)$$

где свободный член

$$l = (A_{*}^{\circ} + Q) - A_{\Delta}^{\text{изм}} = A_{\Delta}^{\text{выч}} - A_{\Delta}^{\text{изм}}, \quad (9)$$

а коэффициенты

$$b = \sin A \operatorname{ctg} z; \quad c = \frac{\sin A \cos q}{\sin t}. \quad (10)$$

При наблюдении n звезд ($n \geq 3$) составляют уравнения вида (8) и из решения их по способу наименьших квадратов находят поправки $\delta A^{\circ}, \delta\lambda^{\circ}$ и $\delta\varphi^{\circ}$ к приближенным значениям $A_{\Delta}^{\circ}, \lambda^{\circ}$ и φ° .

Практически при решении уравнений погрешностей (8) удобно их редуцировать (исключать из них неизвестное δA , входящее с коэффициентом 1) по способу В. Я. Струве*, то есть путем вычитания из каждого уравнения погрешностей среднего уравнения

$$\delta A + b_m \delta\varphi^{\circ} + c_m \delta\lambda^{\circ} + l_m = 0. \quad (11)$$

После определения из двух нормальных уравнений поправок $\delta\varphi^{\circ}$ и $\delta\lambda^{\circ}$ с весами

$$P_{\delta\lambda} = [\Delta c \Delta c \cdot 1]; \quad (12) \quad P_{\delta\varphi} = P_{\delta\lambda} \frac{[\Delta b^2]}{[\Delta c^2]} \quad (13)$$

* Этот способ впоследствии стали неточно называть «третьим правилом Шрейбера».

поправку δA находят из среднего уравнения (11) с весом

$$P_{\delta A} = n \frac{[b]^2}{[b^2]} - \dots \quad (14)$$

Если необходимо получить не астрономический азимут, а геодезический, то уравнения погрешностей следует составлять в виде [10]

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v_i \quad (15)$$

с весом

$$P_i = \sin^2 z_i,$$

где $b_i = -\sin A_i \operatorname{ctg} z_i; \quad c_i = \cos A_i \operatorname{ctg} z_i; \quad (16)$

$$l_i = [a_0 - (A_{0i} + \delta A_i)] - Q_i; \quad (17) \quad \delta A_i = \frac{0,32'' \cos \varphi_0 \cos A_{0i}}{\sin z_i}, \quad (18)$$

и неизвестные:

$$x = \delta \varphi^0; \quad y = 15(\lambda - \lambda^0) \cos \varphi; \quad \Delta a' = \Delta a - 15(\lambda - \lambda^0) \sin \varphi. \quad (19)$$

Таким образом

$$\delta \varphi^0 = x; \quad \delta \lambda^0 = \frac{y}{15} \operatorname{sec} \varphi; \quad \Delta a = \Delta a' + 15 \Delta \lambda \sin \varphi = \Delta a' + y \operatorname{tg} \varphi. \quad (20)$$

Выгоднейшие условия для наблюдений выводятся на основании формул весов определяемых величин $d\varphi$, $d\lambda$ и dA , приведенных в работе [10]. Их главные члены записываются так:

$$P_A = P'_a \cos^2 \varphi = \left\{ [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[(\cos z \cos A)^2]} + \dots \right\} \cos^2 \varphi; \quad (21)$$

$$P_\varphi = P_x = [(\cos z \sin A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\sin^2 z]} + \dots; \quad (22)$$

$$P_\lambda = P_y \cos^2 \varphi = \left\{ [(\cos z \cos A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[\sin^2 z]} + \dots \right\} \cos^2 \varphi. \quad (23)$$

Для определения с максимальным весом азимута необходимо наблюдать звезды на больших зенитных расстояниях равномерно по горизонту, а для определения широты и долготы — на малых зенитных расстояниях, соответственно, вблизи 1-го вертикала и меридиана.

Поскольку в «общем азимутальном способе» совместно определяются φ , λ и A , то желательно соблюдать такие условия наблюдений, при которых $P_A = P_\varphi = P_\lambda$ *. Это обеспечивается наблюдением звезд, равномерно расположенных по азимуту в зоне

* Здесь не учитывается, что во всех способах астроопределений с увеличением широты веса P_A и P_λ уменьшаются пропорционально $\cos^2 \varphi$.

зенитных расстояний от 20 до 50°, то есть на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} \approx 35^\circ$ [10]. Эти условия являются оптимальными и для способа Сомнера, поэтому с точки зрения выгоднейших условий эти методы равноценны по гибкости. Для сравнения точности приведем ожидаемые ошибки определяемых величин:

1. Для способа Сомнера наблюдения 6—8 звезд (равномерно расположенных по азимуту) с помощью инструмента типа У5 или Theo-010 дают ошибки [10] $M_\varphi = \pm 1,0''$ и $M_\lambda = \pm 1,0'' \text{ sec } \varphi$.

2. Для азимутального способа подсчитаем ошибки по формулам [10]:

$$M_\varphi = \frac{\mu}{\cos z_{cp} \sqrt{n/2}}; \quad M_\lambda = \frac{\mu \text{ sec } \varphi}{\cos z_{cp} \sqrt{n/2}}; \quad M_\alpha = \frac{\mu \text{ sec } \varphi}{\sin z_{cp} \sqrt{n}}, \quad (24)$$

где $\mu = \pm 1,7$ — ошибка единицы веса, установленная из опыта для универсала У5 с контактным микрометром. При равномерном расположении звезд по азимуту и $z_{cp} \approx 35^\circ$ получают ошибки

$$M_\varphi = M_\lambda \cos \varphi = M_\alpha \cos \varphi \text{ tg } z_{cp} \sqrt{2} = M_\alpha \cos \varphi \text{ от } 1'' \text{ до } 0,5''.$$

При равномерном расположении восьми звезд по азимуту оба эти способа равноточны:

n	$M_\varphi = M_\lambda \cos \varphi = M_\alpha \cos \varphi$
8	$\pm 1,10''$
10	$\pm 0,9$
20	$\pm 0,7$
36	$\pm 0,5$

Однако действительные погрешности в способе Сомнера будут больше вследствие влияния ошибок рефракции и вертикального круга. Кроме того, «общий азимутальный способ» имеет преимущества по сравнению со способом Сомнера:

- а) приспособленность к суточному движению светил в высоких широтах;
- б) возможность использования инструмента без точно разделенного вертикального круга (например, АУ-2"/10");
- в) одновременное определение координат и азимута;
- г) упрощение организации наблюдений (ненужность измерения метеорологических параметров для учета поправки за астрономическую рефракцию).

К недостаткам «общего азимутального способа» следует отнести:

- а) влияние ошибок делений горизонтального круга;
- б) необходимость учета ускорения звезд по азимуту.

В Антарктиде, начиная с 1961—1962 гг., «общий азимутальный способ» применяли американские геодезисты. До этого они определяли координаты пунктов только по наблюдениям Солнца [12].

В 1961 г. «общий азимутальный способ» был опробован астрономом Лангофером в Вашингтоне [12]. Наблюдения выполнялись инструментом ДКМ-3. При этом координаты φ и λ получены

с ошибками $M_{\varphi} = M_{\lambda} = \pm 0,45''$, а различия с первоклассными определениями не превышали $0,6''$ по φ и $0,5''$ по λ . Указывается, что, наблюдая 15—20 звезд, равномерно расположенных по горизонту, инструментом с точно разделенным горизонтальным кругом, можно получить географические координаты с точностью $\pm 0,5''$.

Подсчитаем по формулам (24) ожидаемые ошибки для «общего азимутального способа» при наблюдении 20 звезд универсалом АУ-2"/10" с контактным микрометром. В этом случае при $\mu = \pm 1,5''$ [10] получаем: $M_{\varphi} = \pm 0,6''$, $M_{\lambda} = M_{\alpha} = \pm 0,6'' \cdot \sec \varphi$. Как видим, ошибки, предвычисленные по формулам (23), хорошо согласуются с полученными в работе [12].

Для Антарктиды точность этого метода американскими геодезистами окончательно не исследована из-за отсутствия опорного астрономического пункта в Западной Антарктиде и из-за значительных отступлений от выгоднейших условий во время наблюдений [11, 12].

Так, в 1961—1962 гг. астроном Д. Ли определил координаты восьми пунктов, используя инструмент Вилд-Т2 [12]. На каждом пункте из-за весьма ограниченного периода работ наблюдали примерно по 8 звезд. Средние квадратические ошибки координат получали в пределах $\pm 0,9'' < M_{\varphi} < \pm 2,8''$ по широте и $\pm 5'' < M_{\lambda} < \pm 9''$ по долготе. Такие большие ошибки объясняются несоблюдением выгоднейших условий, то есть наблюдением звезд лишь в какой-то одной видимой части неба.

В 1964—1965 гг. Д. Альбрайт и Д. Клепп [11] производили астрономические определения на полуострове Росса в Антарктиде «общим азимутальным способом» и способом Сомнера по ярким звездам, равномерно расположенным по горизонту, с инструментом ДКМ-2:

Способ	φ	λ	M_{φ}	M_{λ}	A	M_{α}
«Общий азимутальный»	79°16'01,2"	162°10'58,4"	$\pm 1,0''$	$\pm 2,6''$	49°08'24,2"	$\pm 1,5''$
Сомнера	79 15 44,1	162 10 59,1	3,8	2,7	—	—

Авторы утверждают [11], что «общий азимутальный способ» при определении широты в 3,5 раза точнее, чем способ Сомнера (на основании соотношения ошибок $M_{\varphi} = \pm 1,0''$ и $M_{\varphi} = \pm 3,8''$). Однако, на наш взгляд, это утверждение необосновано, так как, во-первых, определения выполнялись двумя способами на пункте с неизвестными координатами при малом количестве звезд (6—8) и полученные при оценке точности ошибки ($M_{\varphi} = \pm 1,0''$ и $M_{\varphi} = \pm 3,8''$) не объясняют слишком большого расхождения $17,1''$ по широте; во-вторых, у инструмента ДКМ-2 отсутствовал накладной уровень, что не позволило точно определять горизонтальные направления на наблюдаемые звезды в «общем азимутальном методе».

Для исследования этого метода в высоких широтах Ф. Заблоцкий выполнил в августе 1973 г. экспериментальные наблю-

дения в Заполярье ($\varphi \approx 69^\circ$) в дневное время с использованием ярких звезд на одном из астропунктов I класса с астрономическим универсалом УВ-2"/2". До наблюдений были составлены эфемериды, то есть вычислены z и A через каждые 15^m по s для ярких звезд ($m < 2,5$). Звезды наблюдались на зенитных расстояниях от 20 до 65° .

Таблица 1

Результаты наблюдений в Заполярье

Координаты	Истинные	Ошибки	Полученные	Ошибки
Широта	.....2,5"	$\pm 0,2''$	.....57,8"	$\pm 1,4''$
Долгота	.....6,9	0,22	..... 3,6	1,3
Азимут	—	—	..... 2,2	1,4

В связи с неблагоприятными климатическими условиями (частые дожди, облачность) наблюдения выполнялись с 11 по 22 августа по нескольким звездам, в основном в северной и северо-восточной части неба, где чаще всего открывалась кратковременная видимость. В обработку включено 18 приемов. Как видим из табл. 1, ошибки определения φ и λ больше ожидаемых (см. с. 13). Это вызвано крайне невыгодными условиями наблюдений (звезды наблюдались не по всему горизонту, а в одном секторе). Но все же полученные результаты соответствуют по точности пунктам IV класса «Инструкции» 1948 г. Такая точность достаточна в настоящее время и в будущем для многих исследовательских работ в Антарктиде [3]. Для успешного применения «общего азимутального способа» в Антарктиде необходимо иметь точные эфемериды (z и A) наблюдаемых звезд.

Таблица 2

Образец таблиц высот и азимутов звезд (ТВАЗ)

s	f_N	Вега		Арктур		Альтаир		Денеб		Ллиот	
		h	A	h	A	h	A	h	A	h	A
225°	+56'	50°59'	90°	54°18'	199°	17°34'	99°	37°35'	62°	71°42'	289°
226	55	51 34	91	54 06	201	18 08	100	38 06	63	71 09	290
...
270	+27	73 36	155	35 01	254	39 48	144	63 01	93	48 14	306

В 1946 г. Р. В. Куницкий [6] подготовил для целей аэронавигации таблицы высот и азимутов 12 ярких звезд (ТВАЗ) для четных широт от 30 до 76° (табл. 2). В 1955 г. Арктическим институтом изданы по образцу ТВАЗ таблицы высот и азимутов 12 ярких южных звезд (ТВАЗ-ю) для широт от -44 до -88° .

Но таблицы ТВАЗ и ТВАЗ-ю неудобны для полевых астроопределений по следующим причинам:

а) они включают только 12 ярких звезд, которых недостаточно для оперативных определений координат пункта как способом Сомнера, так и «общим азимутальным способом»;

б) звездное время s выражено в градусной мере с шагом 1° , а не в часовой;

в) азимуты звезд вычислены до 1° , что затрудняет их обнаружение, так как поле зрения оптических астроуниверсалов ДКМ-3А, Вильд-Т4, Theo-003 и ТА-05 меньше 1° ;

г) шаг в 2° по широте усложняет интерполирование.

Поэтому целесообразно изменить структуру этих таблиц, в частности для Антарктиды так (табл. 3):

Таблица 3

Образец предлагаемых эфемерид ярких звезд для Антарктиды
(№ 589; $m=2,4$; $\alpha=0^h25^m$; $\delta=-42^\circ26'$)

ϕ s	$-65^\circ00'$		$-66^\circ40'$		...	$-78^\circ20'$		$-80^\circ00'$		ϕ s
	z	A'	z	A'		z	A'	z	A'	
0^h25^m	22°34'	0°00'	24°14'	0°00'	...	35°54'	0°00'	37°34'	0°00'	0^h25^m
35	22 37	-4 48	24 16	-4 30	...	35 55	-3 09	37 35	-3 00	15
45	22 45	-9 35	24 23	-8 58	...	35 57	-6 17	33 37	-6 03	05
....
12 05	72 30	3 52	70 50	3 54	...	59 12	4 18	57 32	4 22	12 45
15	72 33	1 56	70 53	1 57	...	59 13	2 09	57 34	2 11	35
12 25	72 34	0 00	70 54	0 00	...	59 14	0 00	57 35	0 00	12 25

а) таблицы составить для интервала широт от -65 до -80° (то есть для сектора работ советских континентальных антарктических экспедиций) с шагом по ϕ в 1° или $1^\circ40'$ ($100'$), что позволит просто получать эфемериды для пункта наблюдений;

б) давать не высоты h , а зенитные расстояния z , что удобнее при работе с астроуниверсалами и различными таблицами для астрономических вычислений;

в) звездное время s представлять в часовой мере с шагом 10^m ;

г) включить в эфемериды все яркие звезды ($m < 2,5$) с зенитными расстояниями от 0 до 80° * и для каждой звезды отвести 1—2 страницы (в зависимости от формата таблиц).

Такие эфемериды будут полезны для ряда способов астрономических определений в Антарктиде, для исследования астрономической рефракции и т. д.

В 1973 г. А. В. Бушуев и А. М. Брехов [1] составили для Арктики эфемериды 14 ярких звезд для широт $60-90^\circ$ через 10^m по времени до $1'$ через 1° по широте. Они соответствуют этим требованиям.

* Это позволит использовать эфемериды и для отдельного определения азимута на больших зенитных расстояниях.

В табл. 3 в крайних колонках приведено местное звездное время s ; зенитное расстояние z вычислялось по формуле

$$z = \arccos(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t), \quad (25)$$

а азимут (с учетом особенностей суточного движения звезд в южном полушарии)

$$A = \arctg \frac{\sin t}{(\operatorname{tg} \delta \cos \varphi - \sin \varphi \cos t)}. \quad (26)$$

Для каждой широты эфемериды z и A вычислены с шагом t в 10^m от 0^h00^m до 12^h00^m . Поскольку при наблюдениях чаще используется звездный хронометр, то аргумент t заменен местным звездным временем $s = \alpha + t$. В колонке A приведены не азимуты, а румбы. Это позволяет применять эфемериды (вычисленные от 0^h00^m до 12^h00^m) в течение целых суток и сократить таблицы вдвое.

Если время наблюдений (по хронометру) находится в левой колонке, то $A = 180^\circ + A'$, если $A' < 0$, и $A = A'$, если $A' > 0$. Если же время наблюдений в правой колонке, то $A = 360^\circ - A'$, если $A' > 0$, и $A = 180^\circ - A'$, если $A' < 0$.

Для подготовки эфемерид ярких звезд для Антарктиды нами составлена программа на языке АЛГОЛ-60. Табл. 3 представляет образец выдачи эфемерид на страницу АЦПУ (алфавитно-цифрового печатающего устройства) ЭВМ М-222. Данную программу можно использовать для составления эфемерид в любых широтах.

Таким образом, в Антарктиде для определений координат с точностью III, IV класса при наличии инструментов с точно разделенным вертикальным кругом (типа ДКМ-3А, Theo-010, T2, У5 и т. д.) можно применять как способ Сомнера, так и «общий азимутальный способ». При наличии инструмента типа АУ-2''/10'' целесообразно применять «общий азимутальный способ». Но и при наличии инструментов с точно разделенным вертикальным кругом выгоднее «общий азимутальный способ» благодаря его преимуществам, указанным выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев А. В., Брехов А. М. *Астрономические таблицы для северных широт 60—90°*. Л., Аркт. и антаркт. ин-т ГУГМС при СМ СССР, 1973.
2. Вайцекян В. И. *Об астрономических определениях в Антарктиде*. М., ОНТИ ЦНИИГАиК, 1972.
3. Дубовской Б. В. *Картографические исследования СССР в Антарктиде за 10 лет*. — В кн.: *Антарктида. Доклады комиссии 1965 г.* М., «Наука», 1966.
4. *Инструкция по астрономическим определениям пунктов I, II, III и IV классов*. М., Геодезиздат, 1948.
5. Колупаев А. П. *Совместное определение времени и широты по разностям зенитных расстояний и азимутов звезд*. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1959, вып. 124.
6. Куницкий Р. В. *Курс авиационной астрономии*. М., Воениздат, 1949.

7. Лазарев Г. Е. Особенности астрономических определений в Антарктиде. — «Тр. САЭ», 1960, т. 10.
8. Матусевич Н. Н. Лекции по астрономии. Л., ВМА, 1939.
9. Павлов А. А. Дневные наблюдения звезд в Антарктиде. — «Инф. бюлл. САЭ», 1961, № 25.
10. Уралов С. С. Общая теория методов геодезической астрономии. М., «Недра», 1973.
11. Albright J. C., Clapp J. L. Evaluation of Antarctic Star observations. — «J. Surv. and Mapp. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs», 1968, 94, № 2.
12. Lee D. R. Daylight star observations in Antarctica. — «J. Surv. and Mapp. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs», 1964, 90, № 2.
13. Ney C. H. Geographical Positions from stellar Asimuths. — «Transactions, American Geophysical Union», June, 1954.

Работа поступила в редколлегию 22 апреля 1976 г. Рекомендована кафедрой геодезии Львовского политехнического института
