

А. Л. ОСТРОВСКИЙ

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ СИММЕТРИЧНОЙ ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ

Под симметричной программой измерения горизонтальных углов понимается такая программа, в которой половина всех приемов измерения горизонтальных углов на данном пункте выполняется при нормальном распределении температуры воздуха с высотой, то есть при падении температуры воздуха с высотой, а половина приемов, наоборот, — при возрастании температуры воздуха с высотой, то есть при так называемых температурных инверсиях.

Как известно, такая программа угловых измерений приводит к значительной компенсации вредных рефракционных влияний. Идея такого метода высказана нами еще в 1958 г. в работе [1], где указывается, что хорошую компенсацию ошибок дает сочетание дневных и вечерних наблюдений при положительных и отрицательных температурных градиентах.

К настоящему времени метод симметричных наблюдений получил достаточное теоретическое обоснование и экспериментальную проверку. Поскольку с удалением по времени от моментов изотермии искажения углов, будучи противоположными по знакам, обычно возрастают по абсолютной величине, то для более полной симметрии недостаточно иметь равное число приемов измерения при противоположных по знакам вертикальных градиентах температуры. Необходимо еще, чтобы средние моменты времени измерения угла половиной приемов при той или иной стратификации равно отстояли от моментов изотермии.

При измерении углов по способу круговых приемов это требование вести симметричные измерения углов в отдельную видимость выполняется механически, необходимо только беспрерывно вести наблюдения во время видимости. Разумеется, мы полагаем, что продолжительность видимости делится моментом изотермии на две равные части и что производительность измерения углов примерно одинакова в течение всей видимости.

При измерении же углов во всех комбинациях необходимо придерживаться определенного чередования. Например, если на пункте с четырьмя направлениями при нормальном распределении температуры были измерены углы 1—2, 1—3, 1—4, 2—3, 2—4, 3—4 и наступила изотермия, а далее инверсия, то теперь углы следует измерять в обратной последовательности 3—4, 2—4, 2—3, 1—4, 1—3, 1—2.

Если же изотермия наступила после измерения угла 2—3, то далее при инверсии следует измерять углы 2—3, 1—4, 1—3 и 1—2. Углы же 2—4 и 3—4 придется измерять при второй видимости. Совершенно очевидно, что выполнение наложенного условия неприемлемо для произ-

водства уже хотя бы потому, что такое чередование возможно при наличии одновременной видимости по всем направлениям, чего не всегда следует ожидать, а, как известно, способ во всех комбинациях часто находит широкое применение только потому, что не требует наличия одновременной видимости по всем направлениям.

Более того, в погоне за «абсолютной» симметрией как при измерениях углов методом круговых приемов, так и во всех комбинациях пришлось бы простоять в ожидании симметричных моментов времени относительно моментов изотермии.

В самом деле, пусть на пункте с тремя направлениями при нормальном распределении были измерены углы 1—2, 1—3, 2—3. Наступила инверсия. Были измерены углы 2—3, 1—3, и видимость исчезла. Тогда в следующую видимость придется дожидаться инверсии и отступать по времени от момента изотермии на промежуток, равный отстоянию от момента изотермии приема измерения угла 1—2 при нормальном распределении температуры. Совершенно очевидно, что на такие потери времени нельзя согласиться. Да вряд ли они вообще оправданы, если иметь в виду, что нет строгого прямолинейного возрастаия ошибок рефракционного характера с удалением от моментов изотермии, и часто может оказаться, что приемы вблизи моментов изотермии по ряду причин погодного характера более искажены, чем значительно удаленные от моментов изотермии.

Итак, речь идет только о равном числе приемов, выполняемых при нормальном и инверсионном распределении температуры. Этого достаточно. По сравнению с делением программы на ночные и дневные наблюдения описанный метод куда более эффективней в борьбе с рефракцией. Такую программу мы и называем симметричной.

Для построения симметричной программы необходимо знать моменты наступления изотермии в приземном слое воздуха. Эти моменты могут быть определены следующими известными к настоящему времени методами: 1) измерениями температуры на разных высотах по одной вертикали; 2) по колебаниям изображений визирных целей; 3) по времени перехода через нуль радиационного баланса.

Все эти методы имеют как положительные, так и отрицательные качества. Здесь мы намерены предложить еще один метод определения этих моментов, который можно назвать геодезическим, так как он построен на чисто геодезических измерениях, а именно — на измерениях зенитных расстояний.

Рассмотрим сущность метода. Пусть измерения горизонтальных углов предполагается произвести на пункте с известной из геометрического нивелирования абсолютной отметкой и, кроме того, известна из геометрического нивелирования отметка хотя бы одного из наблюдаемых пунктов. Тогда с учетом высоты инструмента и визирной цели над центрами знаков может быть найдено теоретическое зенитное расстояние — Z_t . Измеренное зенитное расстояние — Z по этому же направлению будет искажено частной вертикальной рефракцией — δ .

Так что

$$Z_t = Z + \delta. \quad (1)$$

Если пренебречь вертикальными градиентами влажности, частная вертикальная рефракция в заданном направлении будет слагаться из двух составляющих:

$$\delta = \delta_p + \delta_t, \quad (2)$$

где δ_p — составляющая вертикальной рефракции, обусловленная барическим градиентом, и δ_t — составляющая рефракции, обусловленная вертикальным градиентом температуры воздуха.

Как известно, точечный коэффициент вертикальной рефракции k' , вызванный только падением давления с высотой, определяется формулой

$$k' = 22,870 \frac{P}{T^2}, \quad (3)$$

где P — давление и T — абсолютная температура в воздушном слое.

С другой стороны,

$$k' = \frac{R}{R_c}, \quad (4)$$

где R_c' — радиус световой кривой, обусловленный барическим градиентом, R — радиус Земли, равный 6371 км.

На основании (3) и (4) имеем:

$$R_c' = 270,80 \frac{T^2}{P}. \quad (5)$$

Или в угловой мере

$$\delta_p = 0,370 \frac{P}{T^2} \cdot S, \quad (6)$$

S — длина линии визирования.

Уравнение (1) с учетом формул (2) и (6) примет вид:

$$Z_T = Z + 0,370 \frac{P}{T^2} \cdot S + \delta_T. \quad (7)$$

Если вертикальный градиент температуры на пути луча $\frac{dT}{dh} = 0$

(изотермия), составляющая δ_T также равна нулю. Следовательно, при наличии изотермии равенство (7) примет вид:

$$Z_T = Z + 0,370 \frac{P}{T^2} \cdot S. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно Z , получим:

$$Z = Z_T - 0,370 \frac{P}{T^2} \cdot S. \quad (9)$$

Обозначим:

$$Z_B = Z_T - 0,370 \frac{P}{T^2} \cdot S, \quad (10)$$

где Z_B — вычисленное зенитное расстояние.

Тогда получим окончательно:

$$Z = Z_B, \quad (11)$$

то есть в моменты изотермии измеренное зенитное расстояние должно быть равно вычисленному Z_B .

Иначе говоря, для определения момента изотермии достаточно установить трубу теодолита под наперед заданным зенитным расстоянием. Время, когда труба окажется по вертикали наведенной на цель, будет временем наступления изотермии.

Экспериментальные исследования проводились в июне 1965 г. в Днепропетровской области во время работы научной геодезической экспедиции. Между пунктами триангуляции 1, 2, 3 (см. рис. 1) были проложены нивелирные ходы III класса. Общая длина ходов — более

20 км. На пункте 1 на весь период наблюдений устанавливался теодолит ОТ-02. Под ножки штатива закапывались колья, и теодолит защищался от солнца зонтом и верховой палаткой. Местность — слегка вспаханная, средняя высота визирных лучей — 15—20 м. Теодолитом в течение утренних и вечерних видимостей беспрерывно измерялись горизонтальные углы и зенитные расстояния. За видимость принималось время с наличием оптической видимости при спокойных и слегка колеблющихся изображениях. На высоте теодолита (1,5 м) дополнительно измерялась температура, влажность воздуха — психрометром, давление — анероидом, скорость ветра — анемометром, облачность определялась визуально. Метеорологические наблюдения велись через каждые 10 минут. Отдельный прием геодезических измерений выполнялся в такой последовательности:

1) Измерялись зенитные расстояния:
а) при КЛ (КП) труба последовательно наводилась на визирные цилиндры пунктов 2 и 3 и брались отсчеты по вертикальному кругу (два совмещения штрихов и два отсчета); б) то же при КП (КЛ), но в обратной последовательности.

2) Выполнялось два круговых приема измерения горизонтального угла без перестановки лимба и с замыканием горизонта.

3) Измерялись зенитные расстояния (как в пункте 1).

Таким образом, прием начинался и заканчивался измерением зенитных расстояний. Наблюдения производились с 16 по 21 июня включительно.

Метеорологические наблюдения позволяют определять составляющие вертикальной рефракции — δ_p , вызванные барическим градиентом, и дают общую погодную характеристику. По измеряемым зенитным расстояниям можно не только определять время наступления изотермии, контролировать одновременность наступления изотермии по обоим направлениям, но и изучать характер изменения коэффициента вертикальной рефракции в периоды вечерней и утренней видимости.

Осредненные результаты наблюдений сведены в таблицу. Графы 1—5 таблицы не требуют объяснений. В графике 6 приведены средние значения углов из всех приемов, которые были выполнены за часть видимости с нормальной или инверсионной стратификацией. В графике 7 приведены облачность по пятибалльной системе ($1, \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, 0$), давление воздуха P в мм рт. столба, температура t в градусах Цельсия и скорость ветра v в м/сек.

Величины Z_t и средние δ_p для направлений 1—2 и 1—3 оказались равными:

$$Z_{T_{1-2}} = 89^{\circ} 57' 45'',88; \quad \delta_{P_{1-2}} = 18'',6;$$

$$Z_{T_{1-3}} = 90^{\circ} 03' 30'',86; \quad \delta_{P_{1-3}} = 14'',6.$$

Величины δ_p за время измерений изменились в пределах нескольких десятых секунды, и эти изменения при определении времени наступления изотермии практически не влияли.

Так что:

$$Z_{B_{1-2}} = 89^{\circ} 57' 27'',28; \quad Z_{B_{1-3}} = 90^{\circ} 03' 16'',26.$$

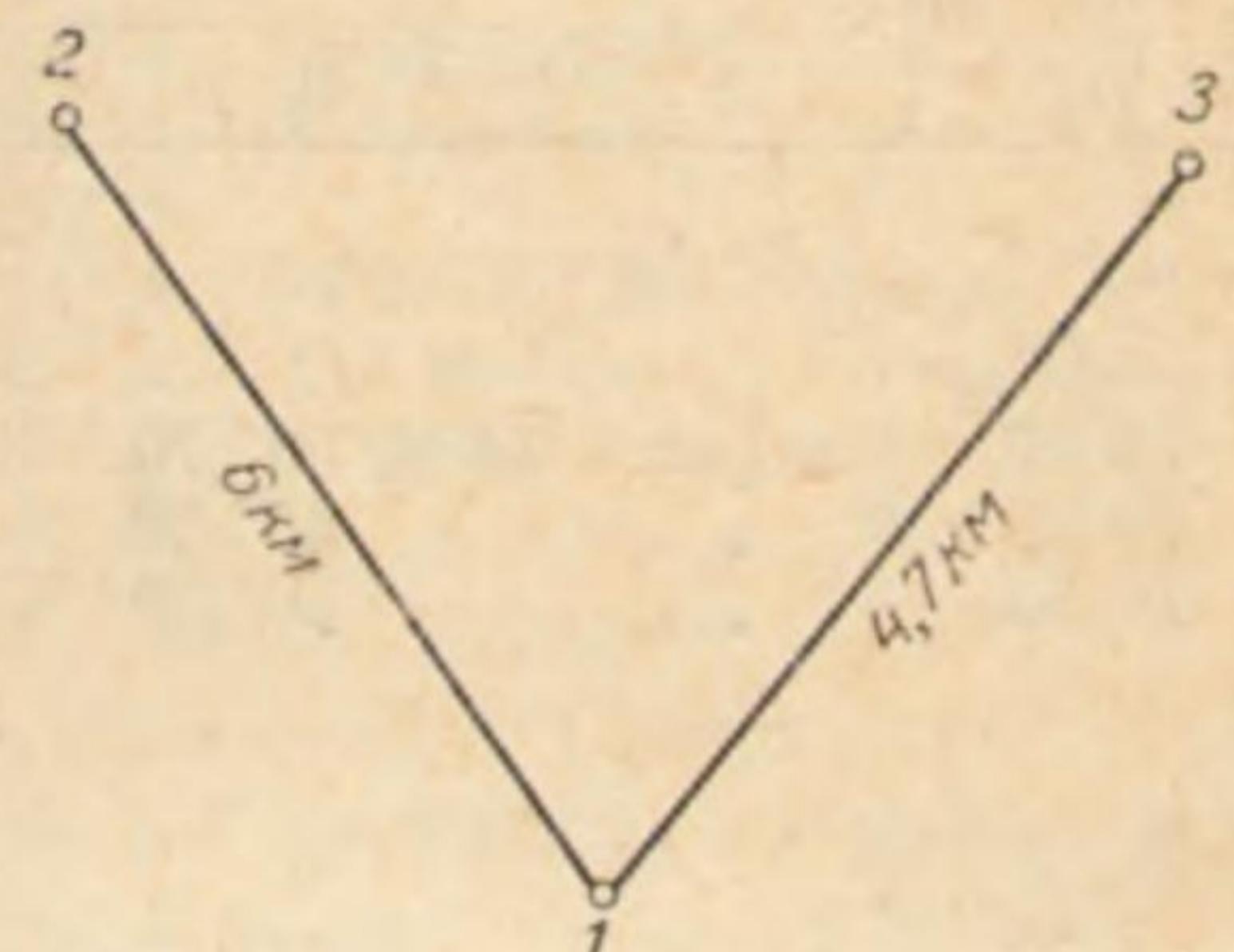


Рис. 1.

**Таблица осредненных значений горизонтальных углов
и зенитных расстояний**

Время (мос- ковск.)	Страти- фикация воздуха	Среднее из 2-х при- емов зна- чение го- ризонт. угла	Измеренные зенитные расстояния		Средние значения углов	Примечание
			Z_{1-2}	Z_{1-3}		
1	2	3	4	5	6	7

16 июня 1965 г.

19 ^h 02 ^m	норм.	74°02'56",70	89°57'32",2	90°03'28",1		облач.—1
19 28	"	55",50	32",4	27",8	74°02'56",23	$P=752,5$
19 53	"	56",50	31",8	28",4	(6 приемов)	$t = 18,2$ $v = 2,5$

17 июня 1965 г.

06 33	норм.	57",35	30",2	03'22",9		облач.—3/4
06 56	"	57",80	32",3	24",6	74°02'57",67	$P=752,0$
07 20	"	57",10	34",4	30",3	(10 приемов)	$t = 15,7$
07 48	"	57",20	37",8	32";2		$v = 4,3$
08 15	"	58",90	41",2	34",2		

18 июня 1965 г.

05 32	инв.	02'54",05	89°57'03",8	90°03'05"8		облач.—1/4
05 52	"	02'54",80	11",0	12"0	74°02'53",94	$P=750,3$
06 11	"	53",15	12",3	17"2	(8 приемов)	$t = 15,3$
06 35	"	53",75	22",2	26"2		$v = 4,6$
06 57	норм.	02'56",20	35",8	32"4		облач.—0
07 16	"	55",35	42",0	37"7	74°02'56",00	$P=750,9$
07 51	"	52",90	39",6	41"8	(8 приемов)	$t = 19,4$
08 14	"	59",55	46",1	46"2		$v = 4,8$

19 июня 1965 г.

05 25	инв.	74°02'55",50	89°55'02"6	90°02'17",2	74°02'56",30	облач.—1/2
05 43	"	59",35	55'3"0	38",3	(8 приемов)	$P=753,0$
06 04	"	56",20	26"4	54",0		$t = 15,3$
06 28	"	54",15	56'34"4	90°03'16",8		$v = 1,5$
06 53	норм.	02'56",10	89°57'33"6	03'23",0		облач.—1/2
07 17	"	57",00	57'44"6	33",2	74°02'57",51	$P=754,0$
07 40	"	57",25	44"4	34",6	(8 приемов)	$t = 20,5$
08 06	"	59",70	44"4	35",5		$v = 2,4$
18 14	норм.	02'55",6	89°57'46"6	90°03'37",0	74°02'56",53	облач.—1/4
18 31	"	02'57",45	57'43"2	33",3	(6 приемов)	$P=754,5$
18 52	"	56",55	32"9	20",3		$t = 27,7$
19 10	инвер.	55",35	22"2	15",7		$v = 3,5$
19 28	"	57",00	19"2	17",0	74°02'56",38	облач.—1/4
19 45	"	56",80	18"0	13",2	(6 приемов)	$P=754,3$
						$t = 26,8$
						$v = 2,2$

20 июня 1965 г.

18 03	норм.	74°02'55",90	89°57'38",0	90°03'33",4		
18 19	"	55",65	39",4	31",2		облач.—1/2
18 38	"	55",70	39",0	31",1	74°02'56",20	$P=754,1$
19 00	"	55",60	39",4	33",6	(14 приемов)	$t = 19,1$
19 17	"	56",35	42",9	35",6		$v = 1,2$
19 34	"	56",80	40",6	32",5		
19 52	"	57",40	33",0	29",2		

I	2	3	4	5	6	7
20 июня 1965 г.						
05 ^h 12 ^m	инв.	74°02'55",90	89°56'53",4	90°02'30",0		облач.—1/4
05 30	"	02'56",0	57'04",0	49",4		P=753,4
05 46	:	54",80	14",0	03'01",4	74°02'55",95	t= 17,0
06 06	:	57",10	22",2	08",5	(8 приемов)	v= 1,5
06 27	норм.	57",80	30",4	20",3		
06 48	"	57",30	35",2	24",4	74°02'56",45	облач.—3/4
07 07	:	55",85	39",2	27",2	(12 приемов)	P=753,4
07 27	:	55",95	37",2	27",0	моя)	t= 18,4
07 45	:	55",95	35",4	28",0		v= 0,6
08 00	"	55",85	42",0	29",6		
21 июня 1965 г.						
06 40	норм.	74°02'56",40	89°57'37",2	90°03'26",4	74°02'58",12	облач.—0
06 55	:	59",15	40",1	33",1	(6 приемов)	P=755,1
07 15	:	58",80	43",4	32",1		t= 15,5
						v= 1,6

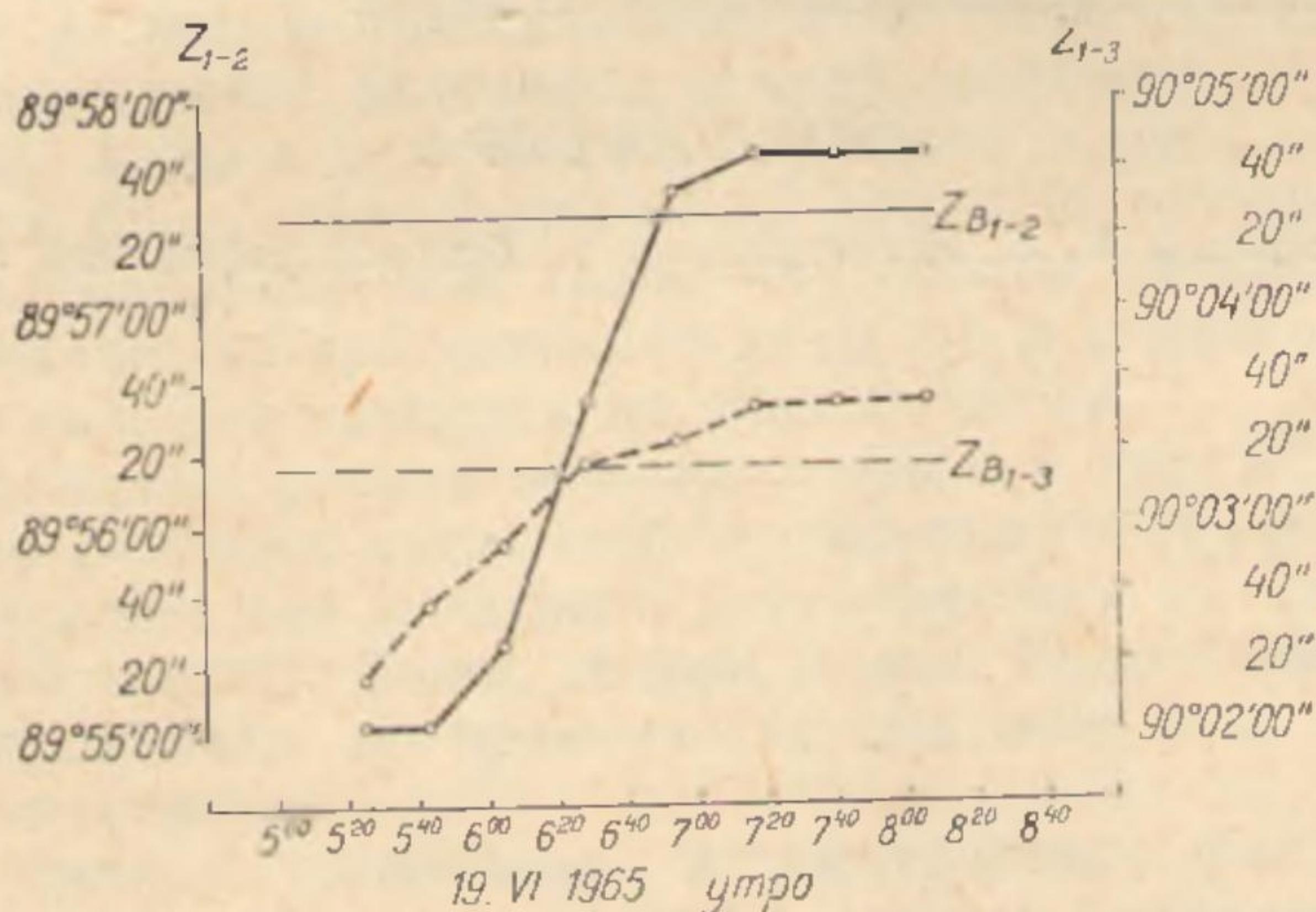


Рис. 2а.

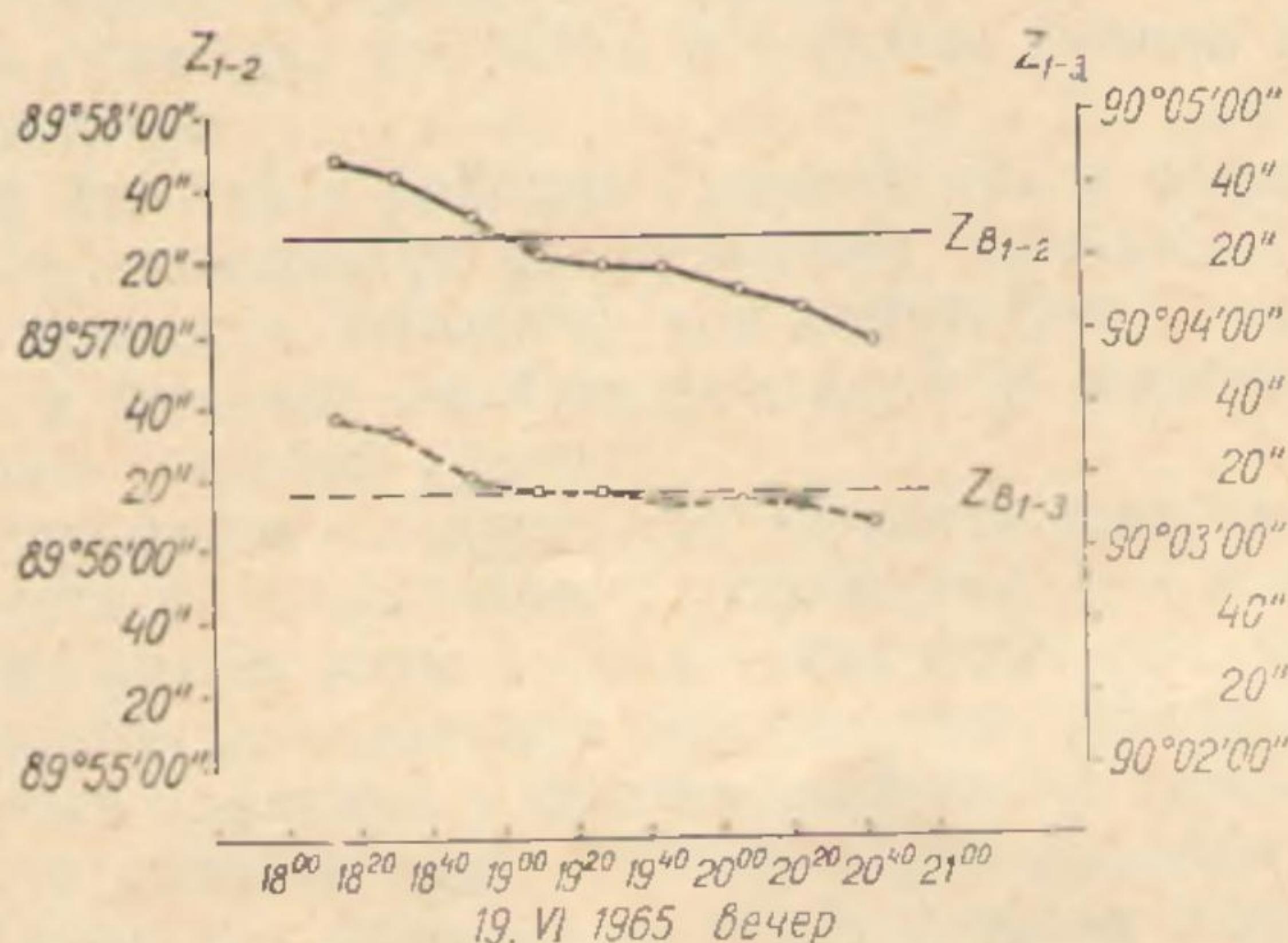


Рис. 2б.

При $Z = Z_B$ имеет место изотермия, при $Z < Z_B$ — инверсия, при $Z > Z_B$ — нормальное распределение температуры.

Для примера на рис. 2а и 2б показан ход измеренных зенитных расстояний в периоды утренней и вечерней видимости 19 июня. При

этом сплошной линией показан ход Z по направлению 1—2, а пунктирной — по направлению 1—3. Такими же линиями нанесены величины Z_{B_1-2} и Z_{B_1-3} .

Как видим, время наступления изотермии, определяемое по одному или другому зенитному расстоянию, не различается более чем на 20 минут.

Для этого же дня как в утреннюю, так и вечернюю видимость горизонтальный угол при инверсии имеет тенденцию к уменьшению. Такая же закономерность имеет место и в остальные дни наблюдений. Среднее значение угла из всех измерений при инверсии оказалось равным $74^{\circ}02'55'',64$, при нормальном распределении — $74^{\circ}02'56'',84$. Разность, обусловленная, вероятно, боковой рефракцией, составила $1'',2$.

Таким образом, экспериментальные исследования полностью подтвердили возможность определения времени наступления изотермии и построения симметричных программ угловых измерений путем сравнения теоретических и измеренных зенитных расстояний.

Такой метод может найти применение на специальных сетях триангуляции, например, на полигонах по наблюдениям за вертикальными и горизонтальными движениями земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Островский А. Л. Исследования по боковой рефракции в полигонометрии. Львов, 1958.

Работа поступила
18 апреля 1966 г.