

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ПРОВЕРЕНО
1961 г.

НАУЧНЫЙ ФОНД

ПРОВЕРЕНО
1960 г.

Т Р У Д Ы ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

ВЫПУСК 9 (71)

МЕТОДИКА
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

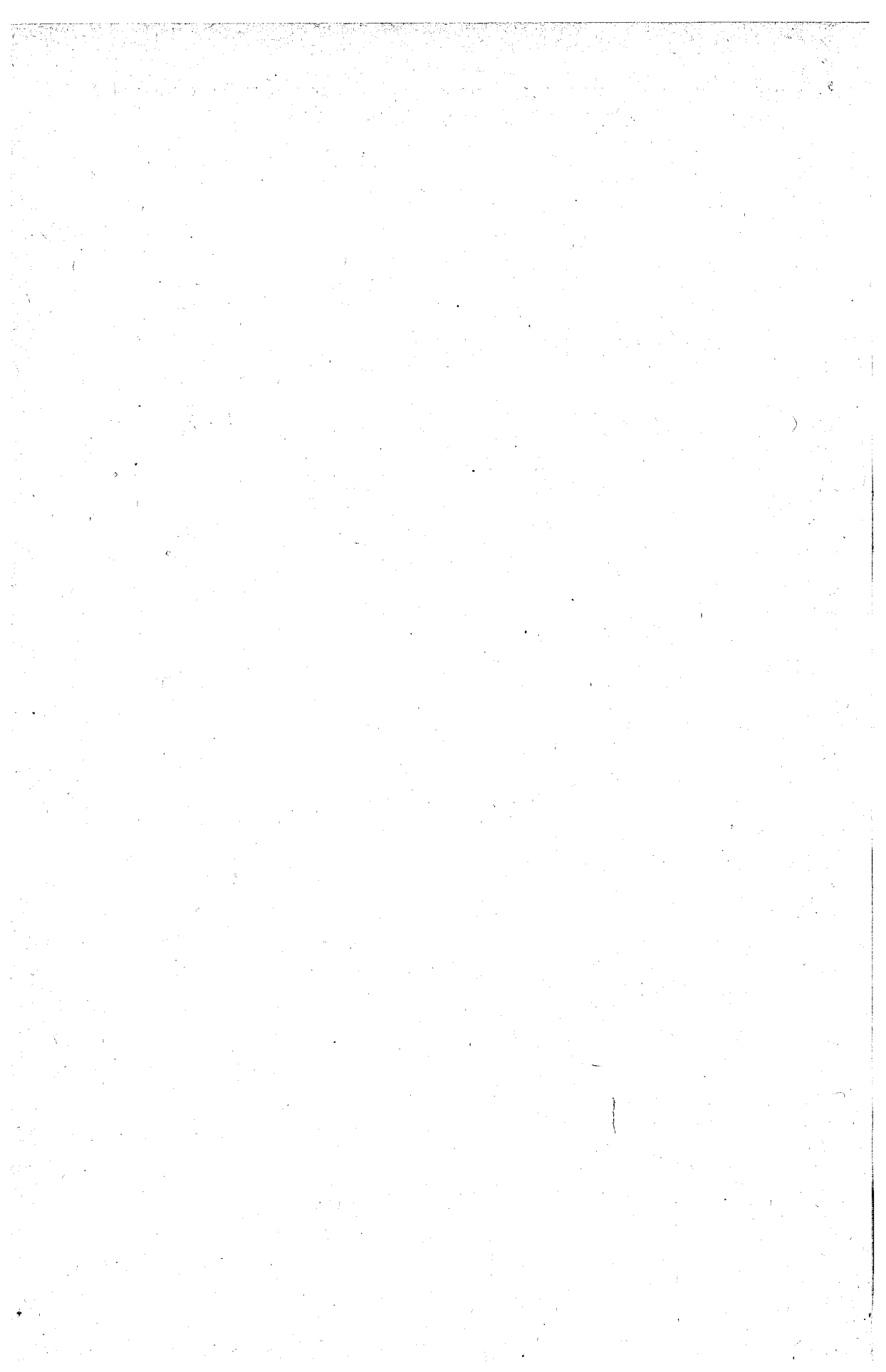
Под редакцией
В. Н. КЕДРОЛИВАНСКОГО

1280 БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1948



ОШИБКИ ГРЕБЕНЧАТОГО РАДИОЗОНДА В СЛОЕ ИНВЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ошибкам гребенчатого радиозонда посвящен ряд статей, опубликованных в Трудах НИУ ГУГМС, серия I, вып. 19 „Вопросы методики аэрологических исследований“.¹

В частности, вероятная ошибка по температуре в слое инверсии принималась равной половине коэффициента чувствительности термомприемника, т. е. в среднем $\pm 0,8^\circ$. Эта величина определялась исключительно конструктивной особенностью прибора, позволяющей фиксировать значения температуры лишь для моментов перехода стрелки с одного зубца гребенки на другой.

В качестве примера приводятся кривые распределения температуры (рис. 1), полученные при выпуске двух радиозондов на одном шаре 18/V 1944 г. в Свердловске. На рис. 1 один радиозонд показывает изотермию, второй — слабое падение температуры с высотой. Интересно отметить, что третий радиозонд, выпущенный на отдельном шаре, спустя 3 мин. показал температуру ниже на 2° и зафиксировал инверсию глубиной $1,4^\circ$. Возможно, что в этом случае мы имели здесь, как определил А. А. Шепелевский, нерепрезентативность отдельного выпуска (отклонившись от пути следования двух первых приборов, третий радиозонд мог встретить в отдельных слоях несколько иное распределение температуры).

Расхождения температуры по 30 точкам в инверсиях из 4 парных выпусков, проведенных в Свердловске, характеризуются следующими величинами:

для синхронных моментов

$$\frac{\Delta t}{2} \text{ абс.} = 0,50^\circ, \text{ крайние значения: } 0,00 - 1,55^\circ,$$

$$\frac{\Delta t}{2} \text{ алг.} = 0,04^\circ, \text{ крайние значения: } -1,55 - 0,80^\circ,$$

на одинаковых значениях высот

$$\frac{\Delta t}{2} \text{ абс.} = 0,60^\circ, \text{ крайние значения: } 0,00 - 1,95^\circ,$$

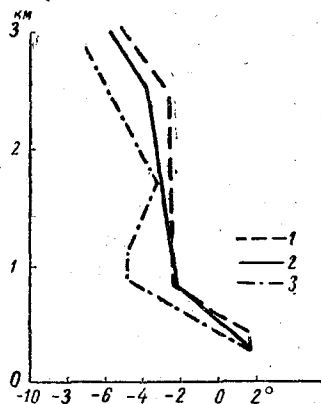


Рис. 1. Ход температуры по выпускам радиозонда.

1, 2 — на одном шаре, 3 — выпуск спустя 3 мин.

¹ Гидрометеониздат, 1946 г.

$\frac{\Delta t}{2}$ алг. = $-0,24^\circ$, крайние значения $-1,95$ $-1,45^\circ$.

(Черта над Δt означает осреднение).

Средняя квадратичная

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{\Delta t_i}{2} \right)^2}{n}}$$

оказалась равной $\sigma = 0,62^\circ$ для синхронных моментов и $0,78^\circ$ для температур на одинаковых значениях высот. На последнюю величину оказали влияние ошибки в определении высоты. Это влияние мало в связи с наблюдениями большинства инверсий в приземном слое.

При подобном сравнении не обнаруживается еще влияние люфтов в сочленениях передачи, создающее отставание при изменении хода стрелки на обратный.

Выявление величины ошибки, вызываемой этим недостатком, из парных выпусков конструктивно одинаковых приборов невозможно.

Решение задачи облегчалось бы наличием эталона.

В качестве эталона был принят радиозонд, работающий на принципе изменения частоты радиопередатчика, учитывая следующие его особенности:

1) работа приемника температуры свободна от всех недостатков механической передачи, в частности от люфтов и от импульсных контактов;

2) автоматическая регистрация показаний термоприемника представляется в виде кривой, практически непрерывной;

3) малая инерция термоприемника.

Предварительные сравнения с гребенчатым радиозондом подтвердили эти положения, показав что: 1) при прямом ходе температуры частотный радиозонд дает значения температуры ниже гребенчатого; 2) в случаях инверсий температуры по-

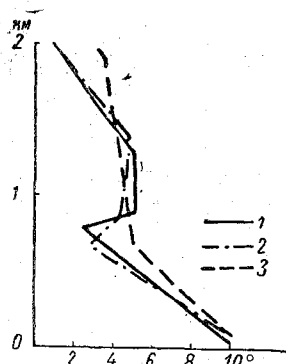


Рис. 2. Ход температуры по подъему самолета в 17 час. 59 мин. и выпуску радиозонда в 17 час. 30 мин.

1 — самолет, 2 — частотный радиозонд, 3 — гребенчатый радиозонд.

лучается обратное; 3) частотный радиозонд дает более детальную регистрацию изменения температуры; гребенчатый сглаживает ход температуры.

Попутно были привлечены к сравнению результаты самолетных подъемов, произведенных в близкие сроки. Всего принято 6 метеорограмм с разницей по времени в одном случае 51 мин., в остальных меньше получаса.

Характерное изменение температуры в слое инверсии по радиозондам и метеорографу показаны на рис. 2. В табл. 1 помещены средние арифметические разности между частотными и гребенчатыми радиозондами и самолетными метеорографами.

Анализ средних разностей температуры показывает:

1) абсолютные и алгебраические разности температур между частотными радиозондами и самолетными метеорографами меньше разностей между гребенчатыми радиозондами и самолетными метеорографами;

2) значения разностей между первыми приборами не возрастают с высотой, как это имеет место между вторыми приборами;

3) за исключением высоты 0,5 км, где на разности оказали влияния инверсии, на всех остальных высотах температуры по гребенчатым радиозондам выше, чем по самолетному метеорографу;

Таблица 1

Разности температур на стандартных уровнях

Способы зондирования	Высота в км							
	0,07	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Частотный радиозонд — самолетный метеорограф:								
Δt_1 абс	0,73	0,72	0,90	0,77	0,78	0,68	0,55	0,53
Δt_2 алг	0,73	0,02	0,07	0,30	0,32	-0,05	-0,32	-0,37
Δt крайние значения	2,2	0,9	1,6	2,2	1,3	1,1	0,5	0,4
	0,2	-1,6	-1,4	-0,8	-1,1	-1,3	-1,8	-1,0
Гребенчатый радиозонд — самолетный метеорограф:								
Δt_3 абс	0,73	0,85	1,38	0,82	0,65	1,18	1,53	1,65
Δt_4 алг	0,73	0,22	-0,02	0,32	0,25	0,85	1,27	1,52
Δt крайние значения	2,2	1,3	1,8	2,3	1,2	2,3	3,3	3,2
	0,2	-0,9	-2,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,6	-0,3
Гребенчатый радиозонд — частотный радиозонд:								
(для тех же случаев) Δt_5 абс . .	0,0	0,48	0,94	0,32	0,62	1,26	1,56	1,60
Δt_6 алг	0,0	0,12	-0,38	0,00	-0,02	0,62	1,24	1,44
Гребенчатый радиозонд — частотный радиозонд:								
(для всех случаев парных выпусков) Δt_7 абс . .	0,0	0,56	0,89	1,09	1,48	1,23	1,52	1,57
Δt_8 алг	0,0	0,28	0,33	0,61	0,08	0,95	1,41	1,51

4) разности между гребенчатыми радиозондами и самолетным метеорографом, с одной стороны, и между гребенчатыми радиозондами и частотными радиозондами, с другой, — весьма близки по абсолютной величине и тождественны по знаку.

Средние разности высот и температур в случаях инверсий и изотермий:

	$\Delta \Phi$ (берки)		Δt	
	абс.	алг.	абс.	алг.
Частотный радиозонд — самолет	96	-18	0,69°	-0,20°
Гребенчатый радиозонд — самолет	272	137	1,89	-0,60

показывают, что по гребенчатым радиозондам высоты особых точек увеличены и разности температуры в инверсиях по вторым приборам в 3 раза больше, чем по первым.

Из анализа приходим к выводам:

1) показания самолетного метеорографа и частотных радиозондов весьма близки между собой;

2) завышенные температуры по гребенчатым радиозондам на стандартных уровнях указывают на большую инерцию их термоприемников по сравнению с частотными радиозондами; на это же указывают и завышенные высоты, на которых гребенчатые радиозонды фиксируют особые точки;

3) рост завышения температур по гребенчатым радиозондам с высотой показывает, повидимому, на влияние солнечной радиации в значительно большей степени, чем это предполагалось ранее;

4) учитывая, что при самолетном зондировании применялись первоклассные метеорографы, следует признать, что близкие к ним показания

частотного радиозонда характеризуют этот последний как более точный прибор по сравнению с гребенчатым радиозондом.

Все это послужило поводом к тому, чтобы воспользоваться частотным радиозондом как эталоном при выяснении ошибки гребенчатого радиозонда в инверсиях.

Экспериментальная часть работы заключалась в выпусках на одном шаре гребенчатого и частотного радиозондов. Такой метод исключал возможные ошибки, связанные с нерепрезентативностью отдельного выпуска и ошибки, связанные с вычислением высот. Выпущено всего 18 пар. Из них 3 пары забракованы и 15 пар приняты в обработку.

Из первичных обработок были составлены таблицы значений температуры для синхронных моментов через 3 мин., что соответствует приблизительно подъему на 1 км, а также обычно принятые таблицы

Рис. 3. Средние алгебраические разности t для синхронных моментов и одинаковых высот.

1 — Δt для синхронных моментов. 2 — Δt для одинаковых высот.

значений температуры на стандартных уровнях и вычислены разности температуры для каждой пары радиозондов и средние их значения, представленные в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Ошибки в определении температуры по гребенчатому радиозонду по сравнению с частотным

Характер разности	Высота, в км											Об- щее
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	
1. На стандартных уровнях (из основных таблиц)												
n	15	15	14	13	13	13	12	10	8	8	5	
$\overline{\Delta t_1}$ абс.	1,09	1,23	1,57	2,07	2,89	3,89	3,90	4,70	4,66	3,56	0,90	2,67
$\overline{\Delta t_1}$ алг.	0,61	0,95	1,51	2,07	2,89	3,89	3,90	4,08	3,94	2,51	-0,90	2,34
Δt крайние значения	$\left\{ \begin{array}{l} 2,4 \\ -2,5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,9 \\ -1,6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,3 \\ -0,2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4,0 \\ 0,7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,6 \\ 0,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 6,2 \\ 0,4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7,5 \\ 0,2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 8,7 \\ -3,1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 10,2 \\ -2,2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 8,9 \\ -2,7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,0 \\ -1,6 \end{array} \right.$	
2. Для синхронных моментов (приведенные к стандартным уровням)												
n	15	15	14	13	13	12	11	9	8	8	5	
$\overline{\Delta t_2}$ абс.	1,40	1,16	1,49	1,89	2,41	2,85	2,97	3,03	3,04	2,68	1,34	2,12
$\overline{\Delta t_2}$ алг.	0,61	0,85	1,43	1,89	2,41	2,85	2,97	3,03	3,04	2,65	1,14	1,97
Δt крайние значения	$\left\{ \begin{array}{l} 2,8 \\ -4,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,3 \\ -1,4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2,9 \\ -0,2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,2 \\ 0,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4,2 \\ 1,1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4,1 \\ 1,8 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4,7 \\ 0,7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,0 \\ 0,6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,0 \\ 2,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,0 \\ 2,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 3,4 \\ -0,5 \end{array} \right.$	

Как было разобрано ранее, Δt для стандартных уровней больше, чем для синхронных моментов, и разности Δt увеличиваются с высотой для

стандартных уровней более интенсивно, чем для синхронных моментов. Новым является систематическое завышение температур гребенчатыми радиозондами.

Ниже 3 и выше 9 км это положение несколько нарушается в присутствии инверсий, в остальной же толще тропосферы все разности имеют положительный знак и указывают на наличие систематической ошибки. Рост этой ошибки равномерен с 2 до 6 км. Затем величина ее сохраняется до 9 км включительно, несколько падает на 10 км и резко уменьшается на 11 км.

Объяснение подобного хода ошибок и величины их только влиянием инерции мало вероятно. В тропопаузе ошибки от инерции и люфтов меняют знак на противоположный, и величина положительной разности, как видим, уменьшается, но все же она остается больше 1°. Повидимому, это следствие влияния солнечной радиации, искажающей показания гребенчатого радиозонда в значительно большей степени, чем предполагалось ранее. Указанное предположение требует проверки посредством выпуска радиозондов до восхода или после захода солнца. Возможно мы имели дело с какими-либо недостатками защиты. Следует отметить, что близкие величины расхождений между радиозондами и самолетными метеорографами для ясных дней получены В. М. Черкасовым¹ в Ташкенте:

Высота, в км	1	2	3	4	5	6
Δt	0,8	1,2	1,3	2,2	2,7	4,3

Автор считает, что указанные расхождения объясняются перегревом радиозондов.

Для исключения систематической ошибки выбраны разности температур для синхронных моментов на участках плавного изменения температуры. Их средние значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики	Время, в мин.									
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Число случаев n	5	7	9	12	12	12	11	8	6	1
Δt°	1,82	1,80	1,82	2,08	2,49	2,96	2,98	2,85	3,07	3,40
Δt° крайние значения {	2,2	3,3	2,5	3,2	4,2	4,1	4,7	5,0	5,0	
	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,8	0,7	0,6	2,3	
Принятые для исключ. значения Δt°	1,8	1,8	1,8	2,1	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

За вычетом указанных систематических ошибок, средние квадратичные ошибки получились равны значениям, приведенным в табл. 4 и на рис. 4.

На первых двух километрах ход объясняется влиянием инверсий: около 70% всех случаев инверсий падает на эти высоты.

Интенсивный рост σ на стандартных уровнях вызван наложением ошибок в вычислении высот, к которым отнесены наблюдаемые температуры. Вычисленные в процентах средние ошибки высот приведены в табл. 5 и на рис. 5.

¹ Труд ГГО, вып. 1 (63). Гидрометеиздат. Л. 1947.

Таблица 4

Характеристики σ	Высота в км											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Об- щее
σ_1 на стандартных уровнях	1,73	1,34	1,29	1,00	1,59	1,94	2,17	3,29	3,91	3,63	3,95	2,29
σ_2 для синхронных моментов (приведенных к стандартным уровням)	2,05	1,55	0,98	0,82	0,75	0,71	1,07	1,30	1,14	1,06	2,25	1,30

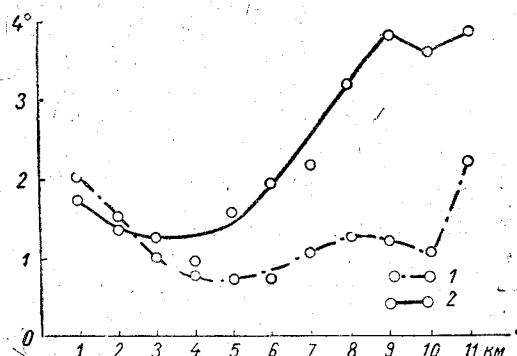
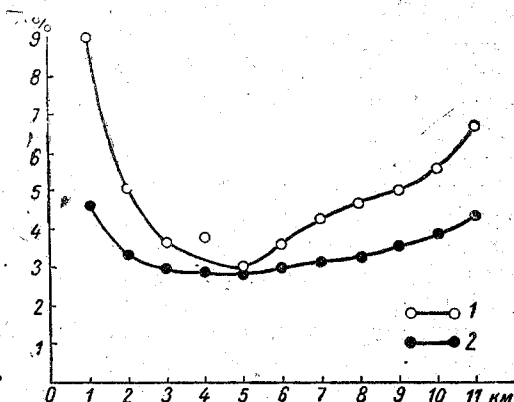
Рис. 4. Значения σ для синхронных моментов и для одинаковых высот после исключения систематических расхождений.1 — σ для синхронных моментов. 2 — σ для одинаковых высот.

Рис. 5. Ошибки определения высоты в процентах.

1 — ошибка по сравнению с частотным радиозондом, 2 — ошибка вероятного максимума.

Таблица 5

Характер ошибки	Высота, в км											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Об- щее
ΔH^0_0 гребенчатого по сравнению с частотным	8,8	5,1	3,7	3,7	2,9	3,5	4,2	4,6	4,9	5,5	6,6	
ΔH^0_0 вероятная максимальная (из предыдущих работ)	4,7	3,2	2,9	2,8	2,8	2,9	3,0	3,2	3,5	3,8	4,2	

Полученные ошибки, как видим, превышают вычисленные ранее вероятные максимальные значения их. Это обстоятельство подтверждает соображения А. А. Шепелевского о заниженности опубликованных максимальных ошибок вследствие подсчетов их для идеальных условий.

Для вычисления ошибок в инверсиях составлены разности значений температуры для начал или концов инверсий и изотермий по одному из пары радиозондов и для синхронных им значений температуры по другому радиозонду. Аналогичным образом вычислены разности для одинаковых значений высот.

Полученные разности не обладают заметным ходом по высоте за исключением 6 случаев выше 10 км для стандартных уровней. Это позволило объединить все полученные 90 разностей.

Средние разности получены:

1) для синхронных моментов: $\overline{\Delta t_1}$ абс. = $1,56^\circ$, $\overline{\Delta t_1'}$ алг. = $0,78^\circ$, крайние значения $\Delta t = 5,2^\circ$ и $-4,3^\circ$,

2) для стандартных уровней: $\overline{\Delta t_2}$ абс. = $1,84^\circ$, $\overline{\Delta t_2'}$ алг. = $0,57^\circ$, крайние значения $\Delta t = 7,5^\circ$ и $-6,4^\circ$.

После исключения систематических ошибок разности равны: для синхронных моментов $\overline{\Delta t_3}$ абс. = $1,69^\circ$, $\overline{\Delta t_3'}$ алг. = $-1,45^\circ$; $\sigma = 2,17^\circ$; для стандартных уровней: $\overline{\Delta t_4}$ абс. = $2,17^\circ$; $\overline{\Delta t_4'}$ алг. = $-1,59^\circ$ $\sigma = 2,91^\circ$.

Из указанных разностей видно, что $\overline{\Delta t_2}$ абс. на стандартных уровнях ($1,84^\circ$) весьма близки к подобным разностям между гребенчатыми радиозондами и самолетными метеорографами ($1,89^\circ$). Исключение систематических ошибок не вызвало заметных изменений абсолютных значений Δt . Алгебраические разности изменили знак на противоположный. Это легко объяснить, если положить, что систематические завышения температуры гребенчатого радиозонда обусловлены влиянием инерции термодатчика и солнечной радиацией, а ошибки в инверсиях связаны, кроме того, с прерывистой регистрацией температуры и люфтами в сочленениях передачи. Обратившись к рис. 2, видим, что при переносе кривой гребенчатого радиозонда влево на величину перегрева при прямом ходе, получим в слое инверсии уже заниженные температуры.

Срединная ошибка $E = 0,6745 \sigma$ определения температуры в инверсиях о гребенчатым радиозондам для синхронных моментов составляет:

$$E_1 = \frac{2}{3} \cdot 2,17 = 1,46^\circ \approx 1,5^\circ.$$

а с наложением ошибок в вычислении высоты возрастает до

$$E_2 = \frac{2}{3} \cdot 2,91,1 = 1,96^\circ \approx 2,0^\circ,$$

ОШИБКИ НЕРЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА НА ВЫСОТЕ ПО ЕДИНИЧНЫМ ШАРОПИЛОТНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Турбулентная структура атмосферы накладывает определенный отпечаток на результаты всех метеорологических и аэрологических наблюдений.

В силу турбулентного состояния воздушной среды два совершенно одинаковых шара-пилота, обладающие одинаковыми объемом (окружностью) и подъемной силой, будучи выпущены одновременно с одного и того же пункта, могут дать несовпадающие между собой значения ветра на тех же высотах.

Попадая в разные атмосферные вихри малого масштаба, два одновременно выпущенные шара могут в дальнейшем двигаться по несколько отличным друг от друга траекториям с различными скоростью и направлением на одинаковых уровнях. К тому же под действием разных вихрей даже одинаковые шары-пилоты будут подниматься с неодинаковой скоростью и достигнут определенного уровня не вполне одновременно, что благодаря изменчивости ветра во времени также вызовет некоторую ошибку измерения ветра на высоте.

Таким образом, в силу турбулентной структуры воздушной среды, одно единичное измерение ветра на высоте, даже при идеальной точности теодолитов, не будет полностью характеризовать воздушный поток или вектор ветра на высоте, т. е. будет не вполне репрезентативным.

В большей или меньшей степени ветер, измеренный по одному шаропилотному наблюдению, получит некоторый отпечаток порывистости, которая будет проявляться тем больше, чем меньше промежуток времени, в течение которого происходит измерение ветра на данной высоте. Более правильное представление о ветре можно получить, взяв среднее значение скорости и направления ветра по данным не одного, а нескольких выпущенных одновременно или последовательно один за другим через несколько минут из одного и того же пункта одинаковых шаров-пилотов.

Отклонения результатов шаропилотных наблюдений от вышеуказанного среднего значения будут характеризовать суммарную ошибку (отклонение), обусловленную не только ошибками самих наблюдений и их обработки, но и влиянием турбулентности среды, или ошибку нерепрезентативности одного шаропилотного наблюдения.

Еще лучше, очевидно, можно будет оценить ошибку нерепрезентативности одного шаропилотного наблюдения, найдя не среднее отклонение, а среднее квадратическое отклонение и, затем, вероятное отклонение, которое и можно рассматривать как вероятную или срединную ошибку, обусловленную нерепрезентативностью единичного шаропилотного наблюдения.

Из вышеизложенного видно, что величину этой срединной ошибки нерепрезентативности можно в то же время рассматривать как некото-

рую меру средней величины порывистости ветра по скорости и направлению.

Для выявления ошибки нерепрезентативности шаропилотных наблюдений в Павловске (Слуцке) под Ленинградом в Аэрологическом отделе Главной геофизической обсерватории нами были организованы в 1941 г. 3 специальные серии базисных наблюдений за шарами-пилотами с трех одинаковых баз.

В настоящей статье излагаются результаты исследования нерепрезентативности шаропилотных наблюдений на основании следующей серии наблюдений.

При одинаковых размерах резиновые оболочки шаров-пилотов (оболочка № 20) наполнялись до одной и той же подъемной силы $A=200$ г и имели окружности, совпадающие в пределах ± 3 см. Все 3 шара выпускались одновременно или вернее почти одновременно: 2 шара (№ 1 и 2) с одного конца базы (башня отдела аэрологии ГГО) и 1 шар (№ 3) с другого конца базы (б. Змейковое отделение отдела аэрологии).

Так как 2 совершенно одинаковых шара, выпущенные с одного пункта, легко могли путаться наблюдателями, то во избежание этого, выпускались строго одновременно лишь 2 шара с разных концов базы (№ 1 и 3). Третий же шар (№ 2) выпускался на 1 мин. позднее и, кроме того, окрашивался чернилами.

Правда, это создавало не вполне одинаковые условия для измерения ветра по двум шарам, выпущенным с одного конца базы (башня), но все же, как мы увидим ниже, существенно не повлияло на результаты, и во всяком случае, было много меньше, чем неточности определения ошибки нерепрезентативности шаропилотных наблюдений, обусловленные сравнительно небольшим числом самих экспериментов. Длина базы в Павловске была равна 1675 м и превышение первого пункта (башня) над вторым — 40 м.

В данной статье использованы сохранившиеся у нас результаты обработки этого вида наблюдений в теплое время года в течение трех дней — 14, 18 и 19/VIII 1941 г. (12 наблюдений).

В табл. 1 приведены результаты базисной обработки ветра всех этих наблюдений для одинаковых высот.

Высоты шара-пилота вычислялись логарифмическим путем по четырехзначным таблицам логарифмов, а скорость v и направление ветра α° по кругу Молчанова с возможно большей тщательностью. Вся обработка велась двумя лицами независимо друг от друга и бралось среднее значение скорости и направления ветра из данных обеих обработок. В случае больших расхождений, превышающих 0,5 м/сек. для скорости и 2° для направления ветра соответствующие точки тщательно проверялись еще раз.

Таким образом, несмотря на то, что вычисление ветра по данным шаропилотных наблюдений производилось не аналитическим, а графическим путем, ошибки самих вычислений ветра невелики и, как увидим ниже, будут во всяком случае значительно меньше ошибок нерепрезентативности шаропилотных наблюдений.

Ввиду небольшого числа измерений вычисление срединных ошибок скорости E_v и направления E_α ветра на высоте производилось нами по трем формулам, а именно:

$$E_{\alpha 1,3} = 0,477 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_1 - \alpha_3)^2}{n}} \quad (1)$$

$$E_{v 1,3} = 0,477 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_1 - v_3)^2}{n}} \quad (1a)$$

Таблица 1

Результаты базисных шарополотных наблюдений в Павловске (Слущке) летом 1941 г.

Высота середины слоя, в км	Шар- пилот № 1		Шар- пилот № 2		Шар- пилот № 3		Шар- пилот № 1		Шар- пилот № 2		Шар- пилот № 3		Шар- пилот № 1		Шар- пилот № 2		Шар- пилот № 3	
	α_1°	v_1 м/сек	α_2°	v_2 м/сек	α_3°	v_3 м/сек	α_1°	v_1 м/сек	α_2°	v_2 м/сек	α_3°	v_3 м/сек	α_1°	v_1 м/сек	α_2°	v_2 м/сек	α_3°	v_3 м/сек
14/VIII 9 04																		
0,0—0,2	141	4,0	138	4,0	150	4,5	134	5,0	129	4,6	145	5,8	125	5,4	125	5,6	129	5,4
0,2—0,4	161	6,1	161	5,3	160	5,5	135	6,0	132	5,4	150	7,8	128	7,6	125	6,5	148	7,0
0,4—0,6	158	8,6	160	7,6	158	5,5	150	7,7	150	7,5	146	7,8	142	8,0	187	7,6	148	9,0
0,6—0,8	153	7,1	158	7,1	157	8,0	149	10,0	153	9,0	151	8,9	146	10,0	149	10,7	146	10,0
0,8—1,0	154	9,1	153	8,6	155	9,0	147	9,9	148	10,2	148	9,8	153	8,1	152	10,9	149	10,0
1,0—1,2	153	9,5	151	8,5	152	10,0	148	11,0	148	10,5	150	10,6	155	11,0	154	11,0	152	12,0
1,2—1,4	156	10,4	150	10,3	156	11,0	151	12,0	153	10,3	153	10,1	152	12,0	157	10,4	156	11,0
1,4—1,6	162	10,3	157	7,6	163	11,5	159	10,0	161	9,6	160	10,0	159	10,0	160	10,9	160	10,0
1,6—1,8	167	10,2	166	10,1	165	11,5	162	9,8	162	10,0	165	11,0	171	11,7	172	11,0	164	11,0
1,8—2,0	175	10,2	175	10,3	175	11,0	177	9,5	170	10,8	173	10,3	180	10,0	180	11,5	178	11,0
2,0—2,5	173	11,4	172	9,2	171	10,5	181	10,0	180	11,4	190	8,3	180	13,4	184	12,5	183	13,0
2,5—3,0	165	11,0	165	10,9	167	11,5	180	10,5	177	12,0	174	9,6	173	11,0	180	10,1	176	12,0
3,0—3,5	170	9,7	169	9,2	166	11,5	171	10,0	—	—	180	9,3	174	10,6	182	6,5	—	—
3,5—4,0	167	12,0	165	13,8	171	11,0	172	10,3	—	—	173	10,6	182	8,0	205	6,0	—	—
4,0—4,5	163	9,4	163	12,2	165	9,5	170	11,0	—	—	168	7,7	189	6,2	—	—	—	—
4,5—5,0	162	8,0	159	11,0	163	10,5	179	9,1	—	—	177	8,0	192	6,0	—	—	—	—
5,0—5,5	171	8,0	175	9,2	175	8,0	185	7,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5—6,0	188	8,0	175	8,1	190	5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,0—7,0	187	5,3	198	5,6	230	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,0—8,0	224	4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,0—9,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14/VIII 12 05																		
0,0—0,2	141	8,6	—	—	—	—	141	8,6	—	—	—	—	137	8,6	—	—	—	—
0,2—0,4	140	8,0	138	7,8	140	7,2	140	8,0	138	7,8	140	7,2	140	8,0	138	7,8	140	7,2
0,4—0,6	144	7,0	142	6,0	141	7,0	144	7,0	142	6,0	141	7,0	144	7,0	142	6,0	141	7,0
0,6—0,8	152	9,7	150	9,0	151	10,3	152	10,5	162	10,0	151	10,3	157	10,5	162	10,0	151	10,3
0,8—1,0	157	10,5	162	10,0	159	10,6	159	12,2	162	11,4	163	10,5	166	10,5	165	11,1	163	10,5
1,0—1,2	166	10,5	165	11,1	163	10,5	174	10,4	171	11,3	—	—	175	10,0	—	—	—	—
1,2—1,4	174	10,4	171	11,3	—	—	175	10,0	—	—	—	—	182	10,7	—	—	—	—
1,4—1,6	175	10,0	—	—	—	—	182	10,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,6—1,8	182	10,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,8—2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,0—2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5—3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,0—3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,5—4,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,0—4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5—5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,0—5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5—6,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,0—7,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,0—8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,0—9,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18/VIII 12 00																		
0,0—0,2	183	9,8	181	12,0	181	10,0	183	9,8	181	12,0	181	10,0	183	9,8	181	12,0	181	10,0
0,2—0,4	186	10,2	182	10,5	184	8,0	178	10,2	182	10,5	184	8,0	186	9,0	186	10,0	171	7,2
0,4—0,6	180	10,2	184	9,0	189	12,0	189	11,0	184	9,0	189	12,0	186	9,0	184	9,8	180	10,8
0,6—0,8	181	12,2	196	12,4	193	11,6	191	12,2	196	12,4	193	11,6	186	8,0	189	8,4	201	8,4
18/VIII 13 15																		
0,0—0,2	156	9,0	156	9,0	156	9,8	180	8,2	183	6,7	175	8,0	183	8,0	185	7,9	173	7,2
0,2—0,4	168	13,0	169	12,0	174	13,0	171	8,2	175	5,4	180	9,8	186	9,0	186	10,0	171	8,9
0,4—0,6	180	10,3	178	9,5	174	9,9	189	11,0	184	9,0	189	12,0	184	9,0	184	9,8	180	10,8
0,6—0,8	181	10,0	186	10,0	190	10,0	191	12,2	196	12,4	193	11,6	186	8,0	189	8,4	201	8,4

0.8-1.0	194	9.6	190	9.8	193	9.8	192	12.1	197	13.2	198	11.6	200	11.0	197	15.0	184	12.5	182	12.0	184	11.6	194	10.3
1.0-1.2	198	9.7	198	8.9	190	8.9	194	11.0	193	11.1	198	9.7	202	10.2	197	15.0	200	11.5	184	10.5	193	10.2	197	9.9
1.2-1.4	193	12.2	195	10.5	197	10.0	197	13.0	198	12.9	199	11.0	210	9.5	202	16.5	208	10.5	206	9.0	202	8.7	210	9.7
1.4-1.6	193	12.2	195	10.5	193	11.4	—	—	—	—	—	—	210	9.8	202	16.5	208	10.5	220	9.0	214	11.0	227	9.1
1.6-1.8	189	13.1	195	10.5	195	11.0	—	—	—	—	—	—	210	7.0	204	13.9	214	11.2	222	9.6	224	9.3	222	9.0
1.8-2.0	194	8.2	194	10.0	193	10.8	—	—	—	—	—	—	207	9.2	208	12.0	205	13.5	230	10.0	228	8.7	227	8.7
2.0-2.5	214	7.0	199	11.0	199	10.7	—	—	—	—	—	—	200	8.6	—	—	—	—	236	7.8	235	7.5	230	8.2
2.5-3.0	216	8.0	218	9.0	218	10.2	—	—	—	—	—	—	198	8.8	—	—	—	—	228	9.6	231	9.1	232	9.9
3.0-3.5	227	6.9	215	9.0	225	10.0	—	—	—	—	—	—	203	8.9	—	—	—	—	224	9.2	210	8.3	222	9.8
3.5-4.0	229	6.4	224	7.0	225	9.0	—	—	—	—	—	—	220	9.0	—	—	—	—	198	9.8	200	10.0	205	10.0
4.0-4.5	232	7.4	233	7.8	226	7.0	—	—	—	—	—	—	212	10.0	—	—	—	—	198	9.8	—	—	202	8.8
4.5-5.0	207	8.4	224	7.5	228	8.0	—	—	—	—	—	—	222	9.5	—	—	—	—	207	8.5	—	—	202	8.8
5.0-5.5	215	9.0	216	8.5	219	9.1	—	—	—	—	—	—	209	10.0	—	—	—	—	212	9.8	—	—	215	11.4
5.5-6.0	213	10.4	214	10.5	214	11.0	—	—	—	—	—	—	207	12.0	—	—	—	—	211	13.0	—	—	217	11.8
6.0-7.0	196	8.7	207	7.0	202	8.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.0-8.0	206	8.0	206	11.0	210	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8.0-9.0	188	2.9	204	2.5	199	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

0.0-0.2	177	8.1	182	8.7	187	8.6	257	7.0	259	6.7	261	5.0	264	6.0	256	8.4	256	5.5	264	5.2	270	5.6	261	6.5
0.2-0.4	198	6.5	182	8.5	181	9.0	255	8.6	260	8.7	262	6.4	262	12.0	272	10.2	256	8.1	250	8.0	257	7.0	253	7.3
0.4-0.6	190	8.0	185	10.6	183	8.5	262	8.3	261	8.5	268	8.2	265	14.0	266	8.5	261	7.9	251	8.0	255	7.3	249	5.9
0.6-0.8	199	9.5	191	10.7	185	10.9	270	8.1	271	10.4	270	9.0	265	12.7	270	8.8	267	10.0	260	7.5	261	8.5	261	7.4
0.8-1.0	198	7.8	199	9.4	192	8.5	271	7.6	275	9.5	275	8.0	272	12.0	271	9.6	270	11.1	270	9.5	277	10.0	270	9.3
1.0-1.2	108	8.0	204	7.1	194	8.6	276	9.2	275	9.7	272	9.0	274	11.5	269	11.2	271	10.4	275	9.5	274	10.1	275	10.1
1.2-1.4	210	12.0	210	13.2	208	9.3	276	10.0	279	9.3	278	8.5	275	9.6	272	10.5	277	8.6	275	9.5	275	10.0	275	8.5
1.4-1.6	—	—	—	—	—	—	281	9.8	280	9.2	275	11.0	276	10.1	280	8.3	277	10.3	275	10.0	277	9.7	275	8.5
1.6-1.8	—	—	—	—	—	—	278	10.4	278	11.5	277	12.5	276	10.1	279	8.9	277	11.3	270	10.0	272	10.0	274	9.5
1.8-2.0	—	—	—	—	—	—	276	11.0	277	11.7	281	12.0	275	10.0	276	9.5	270	9.9	268	8.5	269	9.6	270	9.6
2.0-2.5	—	—	—	—	—	—	277	13.0	278	9.0	275	13.0	264	9.8	265	10.0	270	10.2	260	9.6	257	10.1	258	8.0
2.5-3.0	—	—	—	—	—	—	268	13.0	261	10.6	263	15.0	259	12.2	259	12.0	265	11.8	260	10.5	266	9.7	—	—
3.0-3.5	—	—	—	—	—	—	255	14.3	252	11.1	252	13.9	257	13.0	261	15.6	255	12.7	258	14.0	265	12.0	—	—
3.5-4.0	—	—	—	—	—	—	254	15.0	253	13.0	254	14.5	258	16.0	—	—	258	16.1	—	—	—	—	—	—
4.0-4.5	—	—	—	—	—	—	249	17.7	—	—	250	17.5	245	15.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.5-5.0	—	—	—	—	—	—	241	20.4	—	—	241	18.0	250	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0-5.5	—	—	—	—	—	—	288	22.0	—	—	227	22.0	247	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.5-6.0	—	—	—	—	—	—	241	20.1	—	—	—	—	251	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6.0-7.0	—	—	—	—	—	—	253	20.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7.0-8.0	—	—	—	—	—	—	249	22.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Обращает на себя внимание далее тот факт, что отклонение скорости и направления ветра двух одновременно выпущенных шаров-пилотов, т. е. ошибка нерепрезентативности одного шаропилотного наблюдения сначала с высотой растет до высоты около 400 м, затем выше, примерно до высоты порядка 800 м, уменьшается, еще выше опять растет и затем остается примерно постоянной.

Так как нерепрезентативность измерения ветра на высоте по одному лишь выпуску шара-пилота обуславливается турбулентной структурой атмосферы, то вышеуказанный ход отклонений результатов двух близко одновременных измерений ветра на высоте в одном пункте или в двух близко отстоящих пунктах на расстоянии порядка 1—2 км можно поставить в связь с изменением величины турбулентности (вернее микротурбулентности), атмосферы с высотой, характеризуемой величиной μ коэффициента обмена.

Известно, что изменение коэффициента μ обмена с высотой происходит так, что μ сначала растет, достигает максимума на высоте порядка 200—300 м, затем убывает до высоты примерно 500 м и выше остается приблизительно постоянным по величине.

Аналогичный ход с высотой в связи с изменением с высотой коэффициента обмена имеют также:

1) Срединные ошибки в скорости и направления ветра на высоте метода шаров-пилотов, наблюдаемых с одного пункта, определяемые как

$$E_{v_{1n}} = 0,6745 \sqrt{\frac{(v_{\text{баз.}} - v_{1n})^2}{n}},$$

$$E_{\alpha_{1n}} = 0,6745 \sqrt{\frac{(\alpha_{\text{баз.}} - \alpha_{1n})^2}{n}},$$

где $v_{\text{баз}}$ и $\alpha_{\text{баз}}$ скорость и направление ветра по базисным наблюдениям (с двух пунктов); v_{1n} и α_{1n} скорость и направление ветра по наблюдениям с одного пункта.

Большая турбулентность воздуха на высоте порядка 300 м создает наибольшие отклонения вертикальных скоростей шаров-пилотов от их теоретического значения и должна вызвать здесь большие ошибки метода шаров-пилотов, что и подтверждается по данным М. В. Завариной. С другой стороны, большая величина μ на этой высоте в слое динамической турбулентности вызывает здесь также увеличение порывистости ветра.

2) Ход порывистости ветра с высотой по измерениям П. А. Молчанова имеет такой же вид (т. е. максимум порывистости лежит на высоте порядка 300 м). Это вполне понятно, так как порывистость ветра является одной из характеристик турбулентности атмосферы также как и коэффициент обмена.

Максимум порывистости ветра на высоте порядка 300 м скажется на разности измерений ветра по двум одновременным или близким по времени базисным наблюдениям, которая здесь достигает максимума, обуславливая и максимум нерепрезентативности шаропилотных наблюдений.

3) Аналогично изменяются с высотой средние значения абсолютных величин отклонений $\pm \Delta W$ действительных (базисных) вертикальных скоростей шаров-пилотов от теоретических и средние колебания $\pm \Delta \Delta W$ этих отклонений от среднего их значения $\Delta W_{\text{ср}}$. Правда, максимум величин $\pm \Delta W$ и $\pm \Delta \Delta W$ на высоте 200—300 м, как показали базисные наблюдения Аэрологической обсерватории в Павловске, выражен не всегда достаточно резко, сменяясь иногда постоянством этих величин от земли до высоты 200—300 м или более слабым их убыванием, чем в вышележащих слоях.

4) Точно так же величина разности отклонений вертикальных скоростей шаров-пилотов от теоретических значений в дневные ΔW_d и утренние ΔW_u часы, т. е. величина $\Delta W_d - \Delta W_u$ растет от земли до высоты 200—300 м и лишь затем начинает убывать. Это обстоятельство может быть поставлено в связи с увеличением термических факторов, влияющих на коэффициент обмена и на увеличение общей турбулентности до максимального значения на высоте 200—300 м с последующим ее уменьшением с высотой.

5) Радиус действия шаропилотных наблюдений в пространстве, как показали данные А. Т. Бергуна и М. В. Завариной, соответственно изменению μ с высотой сначала уменьшается, достигает минимума на высоте порядка 900 м над земной поверхностью и выше опять растет. В сущности такой же ход разности двух измерений ветра на двух весьма близких пунктах, находящихся на расстоянии 1—2 км, указывает, что такое же действие турбулентности атмосферы, достигающей максимума на высоте порядка 200—300 м, проявляется в виде минимума радиуса действия шаропилотных наблюдений для станций, расположенных не только на расстоянии нескольких десятков километров друг от друга, но и на весьма близких расстояниях порядка 1—2 км.

Во всех вышеперечисленных явлениях можно усмотреть проявление слоистой структуры атмосферы, а именно свойства слоя динамической турбулентности (микротурбулентности). Именно в этом слое достигается максимум коэффициента обмена, максимум порывистости ветра, максимум ошибок шаропилотных наблюдений, обусловленных максимальными отклонениями вертикальных скоростей шаров-пилотов от их теоретических значений, максимум ошибок нерепрезентативности шаров-пилотов, минимум радиуса действия шаропилотных наблюдений, большие изменения всех метеорологических элементов с высотой и пр.

В ближайшем к земле слое порядка нескольких сот метров имеет место и наиболее резкое изменение с высотой решительно всех метеорологических элементов. Так, в этом слое наиболее резко изменяется с высотой скорость и направление ветра (скорость обычно растет, а направление поворачивает вправо), температура с высотой или быстро падает (летом, днем) или обнаруживает инверсию (зимой, ночью), резко изменяется с высотой также влажность воздуха. Однако слой динамической турбулентности показывает резко отличный с высотой ход не только обычных метеорологических элементов, но и элементов атмосферного электричества (изменение электропотенциала с высотой, проводимости, подвижности ионов), атмосферной оптики (изменение дальности видимости с высотой, коэффициента прозрачности атмосферы), числа пылинок с высотой и прочих метеорологических элементов.

В качестве проявления воздействия турбулентности атмосферы и ее изменения с высотой на ход метеорологических элементов по высоте отметим еще особенности строения так называемой приземной инверсии.

Как показали проведенные нами обработки температурных зондирований атмосферы ряда станций СССР и сравнение их с аналогичными данными зарубежных станций, структура приземной инверсии оказывается более сложной, чем это принято думать.

Полное или частичное разрушение инверсии в слое от высоты нескольких десятков метров над земной поверхностью до высоты порядка 100—200 м несомненно обуславливается максимумом развития в этом слое динамической турбулентности.

Таким образом, несмотря на сравнительно небольшое число проведенных нами шаропилотных наблюдений, совокупность всех вышеприведенных фактов заставляет допустить реальность увеличения ошибки не-

репрезентативности шаропилотных наблюдений от земли до максимального ее значения на высоте порядка 200—300 м в обычных условиях равнинной местности. Уменьшение ошибок нерепрезентативности данных шаропилотных наблюдений может быть достигнуто, как было указано выше, путем осреднения одновременных или близких по времени измерений ветра на высоте.

Еще лучших результатов можно добиться, осредняя эти данные по многократным измерениям ветра по наблюдениям за движением уравновешенного объекта (например, легкого бумажного парашютика, отрывающегося от шара-пилота) на заданной высоте.

Таким же образом, т. е. осреднением одновременных или близких по времени шаропилотных наблюдений, можно добиться и увеличения точности важных для артиллерии баллистического ветра и температуры.

Отметим в заключение, что, несмотря на некоторую нерепрезентативность шаропилотных наблюдений, резкие изменения вектора ветра на высоте отмечаются этим методом, по крайней мере при базисных наблюдениях, вполне удовлетворительно.

Рассматривая материал последовательных ежечасных, а также одновременных выпусков шаров-пилотов (см. табл. 1) можно видеть, что обнаруженный на высоте резкий скачек в ходе скорости или направления ветра (разрыв вектора ветра на высоте по терминологии С. И. Троицкого), как правило подтверждается другим шаром-пилотом. Это, с одной стороны, свидетельствует о значительной устойчивости во времени и по высоте обнаруживаемого разрыва вектора ветра, а с другой стороны, говорит о том, что общий ход изменения ветра с высотой дается единичным шаропилотным наблюдением в общем правильно. Однако, ввиду того, что разрывы вектора ветра на высоте имеют как для аэросиноптики, так и для аэроклиматологии большое не только теоретическое, но и практическое значение, особенно для прогноза погоды, необходимо при обнаружении по одному шаропилотному наблюдению разрыва вектора ветра на высоте произвести немедленно или вскоре вслед за ним второе контрольное наблюдение. Как известно, снижение высоты и обострение разрыва вектора ветра, обнаруженное по ряду последовательных по времени шаропилотных наблюдений, может служить указанием на приближение поверхности раздела двух различных масс, связанной с приближением циклона.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ШАРОПИЛОТНЫХ ТЕОДОЛИТОВ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ ВИЗИРОВАНИЯ НЕПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

1. Постановка наблюдений

Для выяснения точности шаропилотных теодолитов летом и осенью 1941 г. в Ленинграде нами были организованы и проведены визирования неподвижных объектов теодолитами разных систем, а именно: Кузнецова, АТ, АТ-2 и Бамберга.

В этих наблюдениях помимо нас принимали участие Кононов, Мейер, Трусова, Павлова и Голубинская.

Были исследованы:

1) Теодолит Кузнецова № 586. Горизонтальный и вертикальные лимбы разделены на 360 частей. Десятые доли градуса отсчитываются с помощью нониуса.

2) Теодолит АТ № 1320. В работе почти не был. Десятые доли градуса отсчитываются на-глаз, нониуса не было.

3) Теодолит АТ-2 № 3. Лимбы разделены на 1080 делений ценой в 20'. Десятые доли деления отсчитываются на-глаз.

4) Теодолит Бамберга № 101537. Лимбы разделены на 2160 делений ценой в 10'. Десятые доли деления с помощью лупы отсчитываются на-глаз.

Перед наблюдениями все теодолиты были тщательно проверены. Было установлено, что их собственные инструментальные, т. е. систематические ошибки, происходящие от неточного деления шкал, от смещения места нуля вертикального лимба, от наличия коллимации, от эксцентриситета алидад и пр. были пренебрежимо малы.

При тщательном обращении с теодолитом, хорошей его регулировке и установке — систематические ошибки измерений углов будут весьма малы, поэтому ими вполне можно пренебречь.

Обнаруженные систематические ошибки должны быть по возможности устранены путем введения соответствующих поправок.

Правила обнаружения систематических ошибок и учета поправок на них подробно изложены в статье А. В. Михайловского „Ошибки базисных шаропилотных наблюдений“, а также в курсах по геодезии и топографии или практической астрономии. Заметим, что роль систематических ошибок уменьшается еще больше от того, что при измерении скорости и направления ветра на высоте и вертикальной скорости шаропилота, как показывает теория ошибок метода шаров-пилотов, наибольшее значение имеют ошибки измерений не самих углов, а их разности (угловой скорости шара).

При вычислении же разности двух соседних углов их систематические ошибки взаимно вычитаются, тогда как случайные ошибки могут при этом не только вычитаться, но и складываться.

Поэтому остановимся подробнее на случайных ошибках измерения углов.

Измерение горизонтальных углов производилось во дворе Ленинградского института экспериментальной метеорологии (ЛИЭМ) путем визирования семи удаленных объектов, расположенных в различных частях горизонта. Такими объектами служили: 1) громоотвод, 2) антенна, 3) стержень на трубе, 4) флюгер на вышке, 5) антенна, 6) громоотвод и 7) антенна. Визировались лишь острые края этих объектов.

Визирование производилось в круговом порядке от 1-го объекта ко 2-му и т. д. . . к 7-му, снова к 1-му и т. д.

По окончании серий наблюдений, для большей объективности отсчетов, горизонтальный лимб переводился в новое произвольное относительно алидады положение, после чего производились отсчеты для новой серии визирований и т. д. (всего 10 серий).

Визирование производилось всегда одним и тем же лицом (Кононовым). Отсчеты производились для каждого данного визирования несколькими лицами.

Для каждого теодолита производилось по 10 серий отсчетов из 10 серий при произвольной установке. Подведение центра креста нитей на визируемый объект производилось всегда с одной определенной стороны — справа. Это делалось с целью исключения влияния мертвого хода. Установка теодолитов производилась на треногах в одном определенном пункте двора.

Так как при каждой серии отсчетов лимб смещался на произвольный угол, то „наводка“ и „перекидка“ не производились, а контроль осуществлялся двукратным визированием на 1 пункт в начале серии отсчетов и в конце.

Вертикальные углы измерялись во дворе Главной геофизической обсерватории, путем визирования на 5 различных точек антенны, расположенных по вертикали. Чтобы охватить углы в интервале от 10 до 45°, визирование производилось с двух пунктов: близкого и более удаленного. Теодолиты устанавливались на треногах.

Отсчет вертикальных углов производился при установке креста нитей на визируемую точку в направлении сверху вниз, затем снизу вверх, снова сверху вниз и т. д.

2. Результаты обработки экспериментальных наблюдений

Вычисление случайных ошибок углов производилось нами следующим образом. Для каждой пары измерений азимутов двух соседних объектов вычислялись горизонтальные углы $\alpha_{i, i-1}$ между этими объектами как разности их азимутов, т. е. $\alpha_{i, i-1} = \alpha_i - \alpha_{i-1}$, затем вычислялось среднее значение этих углов для каждой из 10 серий измерений $\bar{\alpha}_{i, i-1} =$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{10} \alpha_{i, i-1}}{10}, \text{ составлялись единичные отклонения } \Delta\alpha_{i, i-1} \text{ отдельных изме-}$$

рений от этих средних значений $\Delta\alpha_{i, i-1} = \bar{\alpha}_{i, i-1} - \alpha_{i, i-1}$, их квадраты и, наконец, среднее квадратическое отклонение и вероятное отклонение E_α :

$$E_\alpha = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\bar{\alpha}_{i, i-1} - \alpha_{i, i-1})^2}{2(10-1)}}$$

Величина E_α и принималась нами за вероятную или срединную ошибку измерения горизонтального угла по одной группе измерений. Из полученных таким образом семи величин E_α для семи соответствующих разностей $\alpha_2 - \alpha_1, \alpha_3 - \alpha_2, \dots, \alpha_7 - \alpha_6, \alpha_1 - \alpha_7$ вычислялось затем окончательное среднее значение срединной ошибки E_α . Подобным же образом вычислялись и срединные ошибки измерений вертикальных углов E_β .

Результаты вычислений срединных ошибок E_α приведены в табл. 1.

Таблица 1

Срединные ошибки E_α измерения горизонтальных углов

Система теодолита	Способ отсчета	Отсчитывал углы	Срединная ошибка E_α
Кузнецова "	с нониусом "	Кононов	1,3'
		Майер	1,8
		Среднее $E_\alpha = 1,6'$	
Кузнецова "	наглаз "	Кононов	2,2'
		Трусова	2,0
		Среднее $E_\alpha = 2,1'$	
АТ " "	наглаз " "	Кононов	2,1'
		Майер	2,7
		Трусова	2,4
		Среднее $E_\alpha = 2,4'$	

Результаты измерений теодолитами Кузнецова и АТ приведены в одной таблице по тем соображениям, что теодолит АТ по конструкции мало отличается от теодолита Кузнецова и лишь не имеет нониуса.

Отсюда такая близкая сходимость срединных ошибок E_α измерений горизонтальных углов обоими теодолитами при отсчетах десятых долей градуса наглаз (2,1' и 2,4' или в среднем 2,3').

Далее из табл. 1 видно, что при отсчетах десятых долей градуса наглаз срединная ошибка оказывается весьма близкой к номинальной точности отсчетов, равной половине цены наименьшего деления 3' и даже несколько меньше этой ошибки. По сравнению же с срединной ошибкой E_α отсчетов с нониусом

ошибка при отсчетах наглаз будет больше, примерно в 1,5 раза.

Аналогичные измерения и вычисления ошибок для теодолита АТ-2 и Бамберга дали результат, приведенный в табл. 2.

Таблица 2

Срединная ошибка измерения горизонтальных углов

Система теодолита	Способ отсчета наименьшего деления лимба	Отсчитывал	Срединная ошибка E_α
АТ-2 "	наглаз "	Кононов	0,7'
		Трусова	0,7
		Среднее $E_\alpha = 0,7'$	
Бамберга "	наглаз "	Кононов	0,7'
		Трусова	0,7
		Среднее $E_\alpha = 0,7'$	

Обе системы АТ-2 и Бамберга дают срединные ошибки E_α примерно в два раза меньше, чем у теодолита Кузнецова с употреблением нониуса и примерно в 3—3,5 раза меньше, чем у теодолита Кузнецова или АТ с отсчетами десятых долей градуса на-глаз. Полученные совершенно одинаковые размеры ошибок E_α у теодолита АТ-2 и Бамберга объясняются отчасти недостаточным рядом наблюдений.

Таблица 3

Срединные ошибки E_δ измерения вертикальных углов

Система теодолита	Способ отсчета наименьшего деления лимба	Отсчитывал	Срединная ошибка E_δ
Кузнецова	по нониусу	Кононов	1,3'
АТ	наглаз	"	1,7
"	"	"	1,8
"	"	Трусова	1,4
Среднее $E_\delta = 1,6'$			
АТ	наглаз	Кононов	0,7'

У теодолита АТ-2 в силу большей цены наименьшего деления, отсчитываемого наглаз, точность измерения углов должна быть все же несколько меньше, чем у теодолита Бамберга.

Измерение вертикальных углов δ , проведенное Кононовым и Трусовой дало результаты, приведенные в табл. 3.

Отсюда видно, что срединные ошибки измерения вертикальных углов несколько меньше, чем горизонтальные, но в общем будут того же порядка.

Таблица 4

Срединные ошибки E_α отсчетов углов

Система теодолитов	Способ отсчета наименьшего деления лимба	Отсчитывал	Срединная ошибка отсчета E_α
Кузнецова	по нониусу	Кононов	1,2'
"	"	Мейер	1,7
"	"	Трусова	1,5
"	"	Павлова	1,2
"	"	Голубинская	1,4
Среднее $E_\alpha =$			1,4'
Кузнецова	наглаз	Кононов	1,7'
"	"	Мейер	2,0
"	"	Трусова	2,0
"	"	Павлова	2,4
"	"	Голубинская	2,2
Среднее $E_\alpha =$			2,1'
АТ-2	наглаз	Кононов	0,7'
"	"	Мейер	1,2
"	"	Трусова	1,0
"	"	Павлова	0,6
"	"	Голубинская	1,0
Среднее $E_\alpha =$			0,9'

Для выявления точности отсчетов углов по лимбам в чистом виде были проведены следующие измерения.

Визирования на объект не производилось. По произвольно установленному лимбу производился отсчет последовательно пятью отдельными

наблюдателями, затем труба смещалась на произвольное число градусов и вновь производился отсчет.

Таким образом было проведено 12 серий отсчетов горизонтальных углов только по нониусу теодолита Кузнецова и по 20 серий одновременных отсчетов по нониусу и без нониуса для того же теодолита. Затем было проведено также 20 серий отсчетов без нониуса для теодолита АТ-2.

В табл. 4 даны результаты таких измерений.

Вычисления срединной ошибки одного отсчета угла производились здесь по обычной формуле:

$$E_a = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (\bar{\alpha} - \alpha_i)^2}{(20 - 1)}}$$

Для отсчетов наглаз по теодолиту Кузнецова в табл. 4 приведены средние значения ошибок E_a , полученные из двух рядов измерений по 20 серий. Срединные ошибки отсчетов наглаз без визирования также, как и при визировании неподвижных объектов, оказались в 1,5 раза больше соответствующих ошибок при отсчете по нониусу (теодолит Кузнецова).

Срединные ошибки отсчетов углов у теодолита АТ-2, в свою очередь, в 1,5 раза меньше таковых при отсчете по нониусу у теодолита Кузнецова.

Особенно же необходимо подчеркнуть то обстоятельство, что срединные ошибки измерения горизонтальных углов как при визировании неподвижных объектов (при условии подведения креста нитей на объект с одной стороны), так и при отсчетах углов без визирования объектов почти совершенно совпадают по величине и будут порядка 1' для теодолита АТ-2, 1,5' — для теодолита Кузнецова с использованием нониуса и 2' — для теодолита Кузнецова или АТ при отсчетах наименьших делений наглаз.

Отсюда следует, что ошибка визирования неподвижных точек при наведении на них креста нити с одной стороны близка к нулю.

Ошибка визирования движущихся объектов в ее чистом виде зависит прежде всего от угловой скорости движения визируемого объекта перпендикулярно лучу зрения на него и от величины этой же составляющей углового ускорения объекта.

Так как линейная скорость шара-пилота с увеличением его удаления (а следовательно и высоты), как правило, возрастает значительно медленнее, чем растет расстояние до него от пункта наблюдений, то в результате угловая скорость шара-пилота и его угловое ускорение с высотой обычно уменьшаются, сначала, пока сама угловая скорость и ускорение велики — быстро, а затем медленно. Соответственно этому и ошибка визирования шара-пилота должна уменьшаться с высотой, причем в первые минуты наблюдений — быстро, а затем медленнее.

Обращаясь к результатам экспериментальных исследований ошибок одновременных наблюдений за шаром-пилотом несколькими рядом стоящими теодолитами, проведенных А. В. Михайловским, можно видеть полное подтверждение вышеизложенных соображений.

Согласно вышеуказанному исследованию ошибки наблюдений „в чистом виде“, освобожденные от ошибок отсчетов и ошибок определения инструментальных поправок, ошибок нивелирования и ориентирования теодолитов будут изменяться со временем наблюдений (с высотой) (см. табл. 5).

Наблюдения велись теодолитами АТ-2 с ценой наименьших делений лимбов равной 2' (три серии наблюдений) и 3' (две серии наблюдений).

Из табл. 5 видно, что уже с 4—5-й минуты наблюдений ошибка наблюдений „в чистом виде“ становится близкой к ошибке отсчетов по теодолиту системы АТ-2 с ценой наименьшего деления 2' и будет близкой к ошибке измерения углов этим теодолитом при визировании неподвижных объектов.

Полную срединную ошибку измерений углов легко уже найти по формуле

$$E = \sqrt{E_{\text{наб}}^2 + E_{\text{отсч}}^2}$$

где $E_{\text{наб}}$ — срединная ошибка наблюдений „в чистом виде“ и $E_{\text{отсч}}$ — срединная ошибка отсчета угла¹.

При практическом вычислении полной ошибки измерения углов при шаропилотных наблюдениях — можно принять среднее значение $E_{\text{наб}}$, найденное А. В. Михайловским (табл. 5), как независящие от системы отсче-

Таблица 5

Срединные ошибки E_{α} и E_{δ} наблюдений „в чистом виде“ по А. В. Михайловскому

Минуты наблюдений (высота)	Среднее значение срединных ошибок		
	E_{α}	E_{δ}	$E_{\text{ср}}$
0,5—3 мин. (100—600 м)	3,5'	5,7'	4,6'
4—15 мин. (800—3000 м)	1,2	1,1	1,2
15—30 мин. (3000—6000 м)	0,8	0,7	0,8

тов по лимбам, а для ошибок $E_{\text{отсч}}$ принять их средние величины, найденные выше для различных систем теодолитов (табл. 5).

Вычисленные таким образом ошибки E приведены в табл. 6.

Эти величины E можно принять при нахождении срединных ошибок измерения высот, скорости и направления ветра на высоте по составленным нами таблицам ошибок базисных наблюдений².

В этих таблицах удобства ради мы полагали $E = 1'$, следовательно, приведенные там ошибки следует умножить на соответствующие числа, взятые из табл. 6.

Рассмотренные выше срединные ошибки измерений углов представляют собой некоторые средние величины, относящиеся к „среднему наблюдателю“. Однако ошибки измерения углов зависят также от субъективности наблюдателя.

Как показывают все вышеприведенные таблицы, индивидуальные ошибки наблюдателей колеблются в довольно значительных пределах.

¹ Срединными ошибками $E_{\text{уст}}$ установки теодолита и $E_{\text{ин}}$ от неточного учета его инструментальных поправок пренебрегаем, так как при тщательной установке и учете инструментальных поправок эти ошибки должны быть пренебрежимо малы.

² См. В. М. Михель. „Об ошибках базисных шаропилотных наблюдений“. Труды НИУ ГУГМС СССР. Сер. 1, вып. 19. Гидрометеиздат. Л. 1946.

В табл. 7 мы приводим еще раз срединные ошибки E отсчетов углов для „среднего наблюдателя“ и средние размеры $\pm \Delta E$ колебания этой ошибки, зависящие от субъективности наблюдателя.

Как видно из табл. 7, среднее колебание ошибки отсчета, зависящее от субъективности наблюдателя, будет в общем одинаковым для всех трех систем теодолита Кузнецова, АТ и АТ-2 и достигает $\pm 0,2'$.

Для теодолита Бамберга соответственно большей точности отсчетов углов величины $\pm \Delta E$ будут меньше (повидимому меньше $0,1'$).

Что касается колебаний полной ошибки E измерения углов при шаропилотных наблюдениях и ее колебаний $\pm \Delta E$, обусловленных субъективностью наблюдателя, то они будут, очевидно, больше $0,2'$.

Особенно велики эти колебания будут в первые минуты наблюдений, когда ошибка визирования, а следовательно, и ее колебания для отдельных наблюдателей будут наибольшими.

С высотой благодаря уменьшению ошибки визирования шара ее колебания, вызванные индивидуальностью наблюдателя, несомненно, должны также уменьшаться. Вместе с тем и вызванные субъективностью наблюдателя колебания полных ошибок измерений углов будут с высотой (с продолжительностью наблюдений) приближаться к таковым колебаниям ошибок отсчетов углов.

Отметим далее, что как показало вышеуказанное исследование А. В. Михайловского, число грубых просчетов, при измерении углов на целое число градусов или, во всяком случае, влекущих за собой ошибку; значительно превосходящую максимальную, допустимую для данной системы теодолита, ошибку измерения, наблюдается значительно чаще, чем это можно было бы предполагать.

Такие просчеты составили $2,6\%$ от 1320 измерений углов.

В проведенных нами визированиях неподвижных объектов из 1680 отсчетов явно ошибочных, т. е. связанных с просчетами, оказались $1,4\%$ общего числа отсчетов.

Учитывая, что наши данные относятся к визированиям неподвижных объектов, а данные А. В. Михайловского — к наблюдениям за движущимся шаром-пилотом, когда вероятность грубых просчетов должна увеличиться (грубое подведение шара на центр поля зрения трубы, несинхронность визирований с моментом начала счета минут, промахи при поспешных отсчетах и пр.), следует признать хорошее согласие результатов обоих исследований.

Таблица 6

Полные срединные ошибки E измерения углов при шаропилотных наблюдениях

Минуты наблюдений (высоты)	Система теодолитов				
	АТ	Кузнецова		АТ-2	Бамберг
		без нониуса	с нониусом		
05-3 мин. (100-600 м)	5,1'	5,1'	4,8'	4,7'	4,7'
4-15 мин. (800-3000 м)	2,4	2,4	1,8	1,5	1,4
15-30 мин. (3000-6000 м)	2,2	2,2	1,6	1,2	1,1

Таблица 7

Средние ошибки E отсчетов углов „средним наблюдателем“ и средние отклонения от них, зависящие от субъективности наблюдателя

Система теодолита	E	$\pm \Delta E$
Теодолит Кузнецова при отсчетах с нониусом	1,4'	$\pm 0,2'$
„ наглаз . . .	2,1	$\pm 0,2$
Теодолит АТ-2	0,9	$\pm 0,2$
„ АТ	2,4	$\pm 0,2$

Следует указать, что для уменьшения числа просчетов при отсчетах углов можно допускать нового наблюдателя к шаропилотным наблюдениям только после приобретения им достаточного навыка в наблюдении и отсчетах при данной системе теодолита. Даже опытный наблюдатель, переходя на наблюдения новой недостаточно знакомой им системой теодолита может делать сначала сравнительно много просчетов.

3. Выбор теодолита для шаропилотных наблюдений

Остановимся теперь на вопросе о том, какой из существующих у нас шаропилотных теодолитов будет наиболее пригодным для шаропилотных наблюдений. Для этого после исследования точности теодолитов разных систем разберем их конструктивные особенности.

Теодолит В. В. Кузнецова является одним из наиболее старых, широко применяющихся у нас на аэросети теодолитов. Конструкция его общеизвестна. Поэтому укажем здесь лишь основные недостатки теодолита Кузнецова, которые вызывают давно назревшую необходимость замены этой системы теодолита другой, более совершенной и лучше отвечающей требованиям шаропилотных наблюдений.

Наиболее существенными недостатками теодолита Кузнецова являются:

1) Отсутствие искателя, помогающего наводке трубы на шар и облегчающего удержание шара в поле зрения трубы, особенно в первые минуты наблюдений.

2) Неудобство расположения магнитной стрелки, в силу чего при стрелке, установленной на север, объектив трубы направлен на юг. В результате необычной ориентировки теодолита путем подведения не 0° , а 180° горизонтального лимба под нулевую черту нониуса возникают часто ошибки ориентировки теодолита на 180° .

3) Недостаточные размеры горизонтального лимба.

4) Недостаточная, в особенности для базисных наблюдений, точность отсчетов углов.

5) Излишняя массивность конструкции, требующая большой затраты металла.

6) Неудовлетворительная точность измерений углов для теодолита этой системы при отсутствии нониуса.

Теодолит АТ довольно близок по внешнему виду к известному теодолиту „Геодезия“ и теодолиту Кузнецова.

К сожалению значительная часть отличий, внесенных в конструкцию теодолита АТ с нашей точки зрения не улучшает, а, наоборот, заметно ухудшает ее.

Преследуя, повидимому, цель обеспечения наблюдений и отсчетов одним наблюдателем, конструкторы теодолита АТ совершенно напрасно упразднили нониус, чем снизили и без того невысокую точность измерения углов этим теодолитом почти в 1,5 раза (см. табл. 6).

В первые минуты наблюдений при большой угловой скорости шаропилота отсчеты по нониусу затруднительны, но последний отнюдь не мешает производству отсчетов наглаз. Упразднение же нониуса лишает зато возможности производить более точные отсчеты в последующие минуты наблюдений, когда угловая скорость шара уменьшается и один человек обычно уже легко сможет производить отсчеты, не теряя шара из поля зрения трубы.

Второй недостаток теодолита АТ — недостаточные размеры вертикального круга, что в связи еще с отсчетами десятых долей делений наглаз явно снижает точность измерений.

К тому же, как показывает теория ошибок шаропилотных наблюдений с одного пункта, при одинаковых, допущенных в измерении горизон-

тальных и вертикальных углов ошибках, полученная ошибка в скорости и направлении ветра на высоте будет обычно больше от неправильного определения вертикального угла.

Расположение выреза для отсчета горизонтального лимба не под окуляром, а несколько левее его, является также неудачным, особенно при наличии лампочки для освещения шкалы, которая днем заметно мешает производству отсчетов.

Кроме того, если производить отсчет не отрывая второго глаза от окуляра, то возникает ошибка на параллакс.

Нет также надобности располагать магнитную стрелку так, чтобы для ориентировки теодолита объективом на север совмещать с индексом южный конец магнитной стрелки вместо северного, как у теодолита „Геодезия“.

Круглый уровень на теодолите АТ вместо более точного трубчатого уровня не является целесообразной заменой.

Рабочее положение трубы при вертикальном круге справа, вместо обычного левого положения круга, неудобно, так как требует наведения трубы на шар левой рукой вместо правой. Это неудобство, имеющееся у теодолита „Геодезия“, здесь также остается и, также как и у последнего и теодолита Кузнецова, здесь нет искателя, столь необходимого особенно для первых минут наблюдений.

Рациональным конструктивным новшеством теодолита по сравнению с теодолитом Кузнецова является увеличение размеров горизонтального лимба. Однако и у теодолита Кузнецова увеличение горизонтального лимба может быть осуществлено без всяких затруднений.

Некоторым положительным моментом теодолита АТ является также закрытость лимбов защитным кожухом. В целом однако конструкцию теодолита АТ для шаропилотных наблюдений нельзя признать удачной¹.

Теодолит АТ-2 имеет значительное преимущество перед теодолитом АТ.

У теодолита АТ-2 цена наименьшего деления не 1° , а $20'$. Эти деления рассматриваются через лупу, благодаря чему уже без нониуса отсчеты на глаз производятся с номинальной точностью до $1'$.

К числу недостатков теодолита АТ-2 следует отнести:

Неудобство расположения делений вертикального круга не со стороны окуляра и противоположной стороны, а по боковой по отношению к наблюдателю стороне.

В результате этого производство наблюдений и отсчетов одним наблюдателем весьма затруднено и для этого требуется еще второе лицо.

Кроме того, если в силу большой угловой скорости шара наблюдатель должен следить за шаром и при остановке трубы, то при производстве отсчетов углов головы наблюдателя и помощника сближаются настолько близко, что могут мешать друг другу.

Наконец общим недостатком теодолитов системы Кузнецова, АТ, АТ-2 и сходного с ними теодолита „Геодезия“ является недостаточная сила оптики.

Несомненно в значительной мере по причине недостаточной оптики этих теодолитов даже для ободочки № 20 при оптимальной норме ее наполнения водородом до окружности $C = 255 \pm 5$ см высота, на которой шар-пилот сливается с фоном неба, достигает всего 7—8 км.

¹ Все вышеизложенное, касающееся конструктивных недостатков и малой точности теодолита АТ, к сожалению, почти полностью относится и к более позднему образцу этой системы (теодолит ШТ), так как последний ничем кроме некоторых деталей (замена материала некоторых частей теодолита и пр.) не отличается. Перенос же коробки буссоли, устанавливаемой здесь при ориентировке теодолита на объектив трубы, является неудачным.

На основании вышеизложенных результатов исследования точности шаропилотных теодолитов различных систем, с одной стороны, и разбора их конструктивных достоинств и недостатков, с другой, — можно сделать вывод, что хорошей удовлетворяющей всем требованиям шаропилотных наблюдений системы теодолита пока указать нельзя.

Из трех распространенных изготавливающихся у нас систем теодолитов: Кузнецова, АТ и АТ-2, наиболее удовлетворительным в отношении точности является теодолит АТ-2.

Правда, он, как и другие системы разобранных теодолитов, обладает также некоторыми недостатками, главнейшими из которых является необходимость двух человек для наблюдений.

Теодолит АТ-2 является лучшим из трех рассмотренных систем и вполне пригодным для производства шаропилотных наблюдений.

Теодолит Кузнецова с применением нониуса дает немного меньшую, но также удовлетворительную для практики точность.

Что же касается теодолита АТ, то малая его точность в соединении еще с рядом серьезных конструктивных недостатков делают допустимым использование его только для полевых шаропилотных наблюдений с одного пункта в условиях, когда не требуется слишком большой точности.

Применение теодолита АТ, а также и теодолита Кузнецова без нониуса для базисных наблюдений рекомендовать нельзя.

Отсутствие шаропилотного теодолита отечественной конструкции, хорошо удовлетворяющего всем требованиям практики, ставит с большой остротой вопрос о срочном создании такого теодолита.

К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

Измерения температуры воздуха на некоторой высоте от земной поверхности должны производиться с учетом особых требований к методике наблюдений и конструкции приборов.

Микроколебания температуры воздуха во времени характеризуются долями секунды и амплитудами, достигающими при некоторых условиях нескольких градусов.

Измерительная аппаратура зачастую искажает основной ход температуры и требует внесения ряда поправок, из которых наиболее существенны: инерционность системы и радиационные влияния.

Эти особенности в значительной мере усложняют методику измерения температуры воздуха в целях получения данных для оперативного синоптико-климатологического обслуживания и, главным образом, для решения научно-исследовательских задач по вопросам турбулентности. Общепринятые характеристики турбулентного обмена в приземном слое воздуха требуют определения температурного градиента с точностью до нескольких сотых долей градуса. Эта точность вытекает из расчетных данных по определению коэффициентов обмена и шероховатости.

Чтобы обеспечить указанную точность необходимо иметь такой тип прибора, у которого бы термодатчики не препятствовали свободному обтеканию их воздушным потоком и показания которых не зависели бы от интенсивности солнечной радиации.

В 1933 г. мною был разработан и осуществлен метод, дающий возможность получать температуры, близкие к истинным значениям температуры воздуха.

Принцип основан на наблюдении показаний двух платиновых термометров сопротивления, отличающихся толщинами взятых проволок. Оба датчика поочередно включаются в мост Уитстона. Они расположены на близком расстоянии, чтобы температурные условия были однородными.

Для получения требуемой величины температуры воздуха необходимо сделать два измерения: одно с помощью датчика с тонкой проволокой, например, диаметром в 30 μ , и второе — датчиком из более толстой проволоки, диаметром в 90 μ .

Зная показания тонкого и толстого датчиков и отношение их толщин, можем вычислить значение температуры воздуха в данной точке свободное от радиационной погрешности. Эта величина получается из следующих соотношений.

Обозначая через θ сверхтемпературу более тонкого датчика и зная, что диаметры термометрических проволок относятся как $1:m$, тогда сверхтемпература более толстого датчика будет $m\theta$.

Показания тонкого (t_1) и более толстого (t_2) приемников будут:

$$t_1 = t_B + \Theta$$

$$t_2 = t_B + m\Theta$$

Решая совместно эти два равенства, получаем величину истинной температуры воздуха:

$$t_B = \frac{mt_1 - t_2}{m - 1}$$

Этот метод позволяет исключить радиационную ошибку, но требует монотонного изменения температуры воздуха и, по крайней мере, трех отсчетов (отсчет по тонкому термодатчику, по толстому и опять по тонкому) с последующей арифметической обработкой результатов измерений.

В условиях полета стратостата этот прибор оказался незаменимым, но при измерениях температуры воздуха в нижних, приземных слоях воздуха, где наблюдаются значительные температурные колебания, пригодна только автоматическая и синхронная регистрация показаний обоих термодатчиков.

В 1945—1946 гг. были сделаны попытки упростить методику и аппаратуру, для чего автором была осуществлена дистанционная электроизмерительная установка, собранная по равновесно-неравновесной схеме мостика Уитстона с термодатчиками, изготовленными из платиновой проволоки, диаметром 25 μ в виде спирали. Проволочная спираль защищена от загрязнения и механических повреждений тонкостенным стеклянным капилляром.

Изготовленный указанным образом термодатчик обладал малой температурной инерцией и, в то же время, не изменял своих показаний от скорости ветра, неизбежного явления при конвективном теплообмене, возникающем даже от ничтожного нагрева электрическим током проволоки термодатчика. Эффект нагревания проволоки от проходящего по ней тока может быть заранее вычислен, пользуясь следующей зависимостью:

$$\Delta\Theta = ai - bi^3$$

где i — сила тока, протекающего через проволоку, a — коэффициент теплопроводности среды, b — коэффициент, зависящий от скорости потока, формы и качества поверхности проволоки, $\Delta\Theta$ — возрастание температурного превышения проволоки над температурой окружающей среды в зависимости от силы тока и физических свойств среды и термодатчика.

Термодатчики описываемого прибора были рассчитаны на силу протекающего по ним тока в 5 ма. Эта сила тока вызывала перегрев проволоки, толщиной в 0,025 мм, на 0,1° выше температуры окружающего ее неподвижного воздуха внутри капилляра.

В качестве показателя взят гальванометр типа Депре, шкала которого градуирована в градусах Цельсия.

В зависимости от условий измерения прибор включается или по схеме a (рис. 1), позволяющей получать абсолютное значение температуры воздуха данной точки, или по схеме b (рис. 1) дающей непосредственную разность температур между двумя точками пространства.

В первом случае специальный трехконтактный переключатель P осуществляет попеременное включение или контрольного сопротивления R_4 , по которому регулируется сила тока мостика, составленного из марганцевых сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , или термодатчиков, расположенных на выбранных высотах.

Для измерения температурной разности включение производится по схеме *б* (рис. 1). В этом случае поворотом выключателя *В* закорачивается сопротивление R_3 , а концы проводов, идущих от термодатчиков, подключаются так, чтобы компенсационные провода выбранной пары термодатчиков были вместе включены под среднюю клемму, а основные — поджаты к крайним клеммам.

Переключателем *Р* вводится в цепь моста соответствующая пара термодатчиков.

Исследование радиационного влияния на показания термодатчиков было проведено Т. Огневой летом 1946 г. на Всеволожской метеостанции.

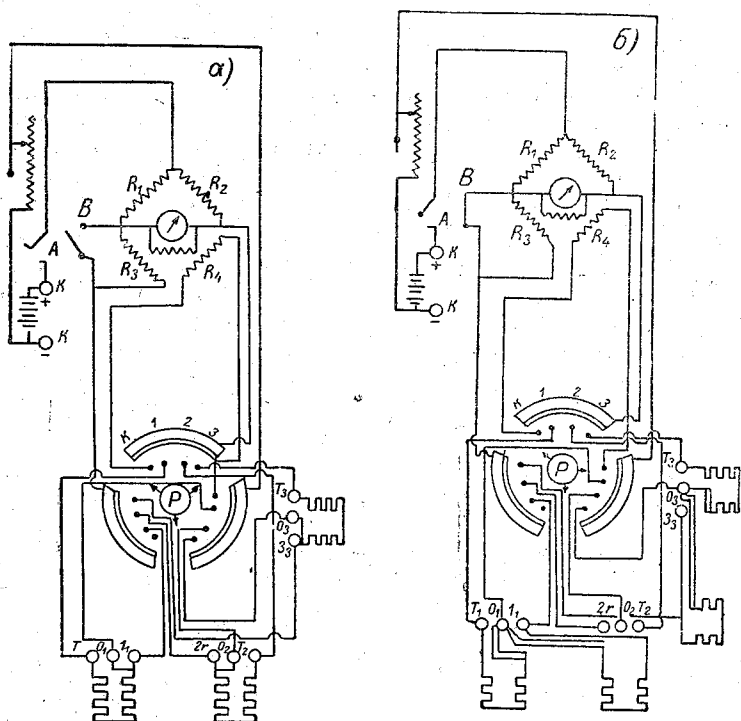


Рис. 1. Схемы включения термометров сопротивления для измерения.
а) в каждой точке, б) на температурную разность.

Термодатчики были установлены на выдвижных рейках длиной в 3 м. с северной стороны верхней площадки триангуляционной 35-метровой вышки.

Приемники были установлены на данной высоте для того, чтобы характер подстилающей поверхности не оказывал влияния на показания термодатчиков.

Один термодатчик весь период испытания подвергался непосредственному действию прямой и рассеянной радиации; два других попеременно помещались под защиту только от прямой и от прямой и рассеянной радиации.

Защита от прямой радиации состояла из кольцевого экрана, шириной 200 мм, диаметром 500 мм, ориентированного по широте данного места.

Влияние рассеянной радиации исключалось ординарным, а затем двойным щитком, укрепленным над термодатчиком.

На рис. 2 показаны: крепление термодатчика 1 с щитками 2 и экран 3.

Защита описанного типа не препятствует свободному контакту термодатчика с окружающим воздухом и в то же время предохраняет термодатчик от радиационного влияния.

Для сравнения, одновременно с наблюдениями по термометрам сопротивления, производились параллельные отсчеты по термометрам психрометра Ассмана и наблюдались скорость и направление ветра.

Психрометр Ассмана и анемометр устанавливались вблизи экрана термодатчика на выдвижных рейках.

Наблюдения производились в следующей последовательности: за 5 мин. до отсчетов по термометрам включался ручной анемометр, затем делалось 5 отсчетов по психрометру и 8 отсчетов по термометрам сопротивления. Отсчеты производились в следующем порядке: психрометр, термодатчики¹ 2, 3, 4, затем 4, 3, 2, психрометр; через 5 мин. в том же порядке производилась новая серия отсчетов.

Направление ветра определялось по полевому ветромеру автора.

Перед наблюдением оценивалась форма и количество облаков, ставился знак солнечного сияния и отмечались прочие явления.

Наблюдения проводились в полуденные, ночные, утренние и вечерние часы при различных погодных условиях.

В процессе наблюдений была установлена зависимость показаний *термодатчиков от степени их экранировки и было отмечено, что показания психрометра Ассмана становятся менее надежными при скоростях ветра превышающих 6 м/сек., несмотря на наличие ветрового щитка и его правильную ориентировку, как рекомендуется в инструкции.

Рис. 2. Общий вид датчика.

В сводной табл. 1 средних отклонений величин сравнений термодатчиков сопротивления и данных психрометра Ассмана, приведено влияние экранирования на показания термодатчиков в зависимости от периода наблюдений, скорости ветра и состояния неба.

Таблица 1

Период наблюдений									
	Полдень			Ночь			Утро — вечер		
Скорость ветра м/сек.									
Состояние неба	до 2	2—5	>6	до 2	2—5	>6	до 2	2—5	>6
Термоприемник в экране									
Ясно	0,3	−0,1	−0,4	−0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Пасмурно	0,0	0,0	−0,3	−0,1	0,0	−0,1	−0,1	0,0	0,0
Термоприемник без экрана									
Ясно	0,7	0,2	−0,1	−0,2	−0,1	0,1	0,3	0,0	−0,1
Пасмурно	0,2	0,1	−0,2	−0,2	−0,1	−0,1	0,1	0,1	−0,1

¹ Термодатчик 1 был разбит шквалом до начала наблюдений.

Из табл. 1 видно, что в полдень при ясном небе и отсутствии ветра показания термоприемника, даже при его экранировании, выше показаний психрометра Ассмана на $0,3^\circ$; если же термоприемник подвергается непосредственному действию прямой радиации, то эта разность достигает $0,7^\circ$.

В пасмурный день отклонения в $0,2^\circ$ наблюдаются только у термоприемников, установленных без экрана, что указывает на влияние рассеянной радиации от облаков.

В ночные часы знак разности меняется вследствие излучения самого приемника.

При скоростях ветра выше 6 м/сек, психрометр Ассмана дает завышенные показания, причем наибольшие разности наблюдаются в полуденные часы; при указанных скоростях ветра аспирация психрометра нарушается. Предусмотренный в этих случаях ветровой щиток, прилагаемый к психрометру, не полностью исправляет этот аэродинамический дефект прибора.

Проведенное исследование показало, что защита термоприемника от радиации, помощью коаксиального кольцевого экрана с двойным щитком от рассеянной радиации, обеспечивает наблюдения над температурой воздуха только до десятых долей градуса.

Однако, как показал в своей работе Е. С. Ляпин, величина температурного градиента воздуха должна определяться с точностью до сотых долей градуса.

Такой точности нельзя требовать от общепринятых термометрических установок.

Чтобы получить заданную точность в последнее время мною разработана схема установки, позволяющая дистанционным способом получать значение градиента или температуру воздуха, свободные от радиационного влияния.

Как указывалось вначале, значение температуры воздуха, свободное от влияния радиации, получается из равенства $t_B = \frac{mt_1 - t_2}{m - 1}$, которое может быть получено электрической схемы, приведенной на рис. 3.

Прибор собирается на принципе неравновесного мостика Уитстона 3 плеча которого изготавливаются из проволок с большим температурным коэффициентом, а четвертое — из манганина.

Термопровода различаются толщинами, причем диаметр толстой проволоки должен быть в 2 раза больше диаметра термоприемника из тонкой проволоки. Тонкие проволоки включены в противоположные ветви мостика, обозначенные на рис. 3 буквами R_2 и R_4 .

Сила тока, протекающего через гальванометр неравновесного моста, определится уравнением:

$$I_{\Gamma} = \frac{E(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_{\Gamma}[(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)R + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)] + R(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)}$$

или, заменяя электродвижущую силу батареи E разностью потенциалов V на зершинах мостика, можем упростить данное уравнение следующим образом:

$$I_{\Gamma} = \frac{V(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_{\Gamma}(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)}$$

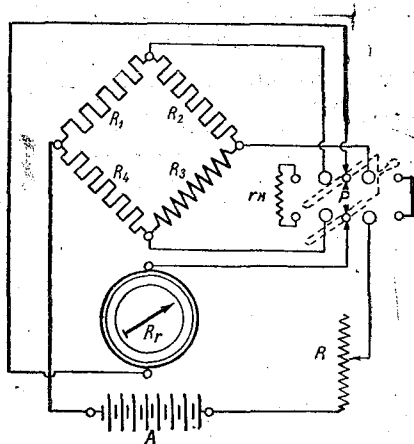


Рис. 3. Схема измерителя истинной температуры.

где R_1 — сопротивление толстой проволоки, R_2 и R_4 — сопротивление тонкой проволоки, R_3 — манганиновое сопротивление, R_r — сопротивление гальванометра, R — сопротивление регулировочного реостата.

Питание моста осуществляется источником постоянного тока A . Регулировка силы тока производится подгоночным реостатом R , включая вместо моста эквивалентное ему сопротивление r_k , при помощи переключателя P .

Данная схема позволяет автоматически исключать радиационные, вентиляционные и другие ошибки, давая близкую к действительной температуру воздуха в данной точке. Имея ряд таких приемников, можно изучать температурный градиент с точностью до сотых долей градуса, в соответствии с теоретическими требованиями наших дней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляпин Е. С. Зависимость коэффициента перемешивания от вертикального распределения температуры воздуха. Труды научно-исслед. учр. ГУГМС СССР. Сер. 1. вып. 34, Гидрометеониздат. 1946.
2. Третьяков В. Д. Фототермограф, исключая солнечную радиацию. Журн. Вестник ЕГМС, № 3. 1934.
3. Третьяков В. Д. К вопросу о методах измерения температуры воздуха в свободной атмосфере. Труды I. Всес. конф. по стратосфере. Изд. А. Н. СССР. 1935.

К ВОПРОСУ О ПАРАМЕТРАХ, ХАРАКТЕРИСТИКАХ И ШКАЛЕ ДИСТАНЦИОННОГО ПСИХРОМЕТРА

При изготовлении и эксплуатации дистанционного психрометра, как и всякого технического устройства, чрезвычайно важна возможность конкретной оценки его качества и сравнения различных систем приборов между собой. Для этой цели обычно служат специальные параметры и характеристики, определяющие основные эксплуатационные качества прибора. В настоящей статье предлагаются определения таких основных параметров и характеристик для дистанционного психрометра.

Одним из возможных решений вопроса о дистанционном психрометре является использование для этой цели термометров сопротивления с схемой неравновесного моста Уитстона. Построенные на таком принципе приборы уже выпускались фирмой Гартман-Браун с весьма своеобразной шкалой, позволяющей производить непосредственный отсчет относительной влажности. Конкретных материалов по вопросу о расчете такой шкалы в специальной литературе не имеется и решение этого вопроса представляет практический интерес. Поэтому в конце настоящей статьи предлагается методика расчета такой шкалы, являющаяся, кроме того, хорошей иллюстрацией практического применения параметров и характеристик психрометра.

Для характеристики качества дистанционного психрометра можно предложить два следующих основных параметра:

1) „Чувствительность“ (α) психрометра, определяемая величиной отклонения стрелки прибора индикатора при изменении относительной влажности на 1%, или

$$\alpha = \frac{\Delta n}{\Delta r^0/\%}. \quad (1)$$

2) „Степень неравномерности чувствительности по диапазону температур“ (K), определяемая величиной отношения средней чувствительности прибора при максимальной температуре ($T_{\text{макс}}$) к средней чувствительности при минимальной температуре ($T_{\text{мин}}$), т. е.

$$K = \frac{\alpha_{T_{\text{макс}}}}{\alpha_{T_{\text{мин}}}}. \quad (2)$$

Кроме указанных основных параметров, дистанционный психрометр имеет еще ряд параметров второстепенных. Например: термическую инерцию приемников температуры, дистанцию измерения и др., не имеющие принципиального значения, поэтому они в настоящей статье не рассматриваются.

Чувствительность α является результирующей чувствительностью всего психрометрического устройства и определяется совокупностью частных

чувствительностей, которые, согласно их физическому смыслу, можно обозначить как: а) психрометрическая чувствительность и б) термометрическая чувствительность.

Рассмотрим несколько подробнее, что представляют эти частные параметры и чем они определяются.

Психрометрическая чувствительность (α_n) характеризует чисто психрометрические свойства прибора и равна приращению разности температур сухого и смоченного термометров (δT), отнесенному к соответствующему приращению относительной влажности ($\Delta r^0/0$), при постоянной температуре сухого термометра (T), т. е.

$$\alpha_n = \left| \frac{\Delta \delta T}{\Delta r^0/0} \right|_{T=\text{const.}} \quad (3)$$

Определение психрометрической чувствительности производится на основании следующих соображений.

Возьмем психрометрическую формулу:

$$e = E' - AH(T - T'), \quad (4)$$

где e — абсолютная влажность воздуха, E' — упругость водяного пара, насыщающего воздух при температуре T' , T — температура по сухому термометру, T' — температура по смоченному термометру, H — давление воздуха, A — психрометрическая постоянная.

Перепишем эту формулу, введя обозначения: $T - T' = \delta T$ и $AH = B$, тогда

$$e = E' - B\delta T \quad (4a)$$

При постоянных значениях величин A и H и при постоянной температуре T , можно выразить абсолютную влажность в виде функции одной только разности температур, т. е.

$$e = |f_1(\delta T) - f_2(\delta T)|_{T=\text{const.}} \quad (5)$$

Разделив обе части равенства (5) на величину упругости насыщенного пара воды $|E|_{T=\text{const}}$, получим выражение для относительной влажности:

$$r = \left| \frac{f_1(\delta T)}{E} - \frac{f_2(\delta T)}{E} \right|_{T=\text{const.}} \quad (5a)$$

Графическое построение зависимости (5a) для различных температур T дает семейство кривых, которые являются основными характеристиками психрометрического устройства.

Построение этих характеристик для любого типа психрометра производится путем подсчета величин e по выражению (4a), а затем — величин $r^0/0$ для рабочего диапазона разностей температур δT при различных постоянных температурах сухого термометра (T).

Для этой цели надо предварительно экспериментально определить психрометрическую постоянную испытуемого психрометра. Методика этого определения достаточно известна, поэтому мы на ней не останавливаемся. Величина барометрического давления при расчетах может быть принята постоянной и равной 1000 мм. Рабочий диапазон разностей температур δT для каждого значения температуры T определяется, исходя из условия (вытекающего из физического смысла), что при расчетах по формуле (4a) величина e должна быть всегда положительной, т. е.

$$B\delta T \leq E' \quad (6)$$

Задаваясь некоторым диапазоном разностей δT при $T = \text{const}$, определяем для каждого частного значения $|\delta T|_{T=\text{const}}$ соответствующие вели-

чины E' и $B\delta T$ и отбираем [те значения δT , при которых выполняется условие (6). Величина E' для каждой данной температуры T и разности температур δT определяется по кривой зависимости $E=f(T)$ для точек соответствующих $T-\delta T=T'$. Для этой цели могут быть использованы данные о величине упругости паров воды при различной температуре, имеющиеся в литературе, например в „Психрометрических таблицах“¹ (табл. II В).

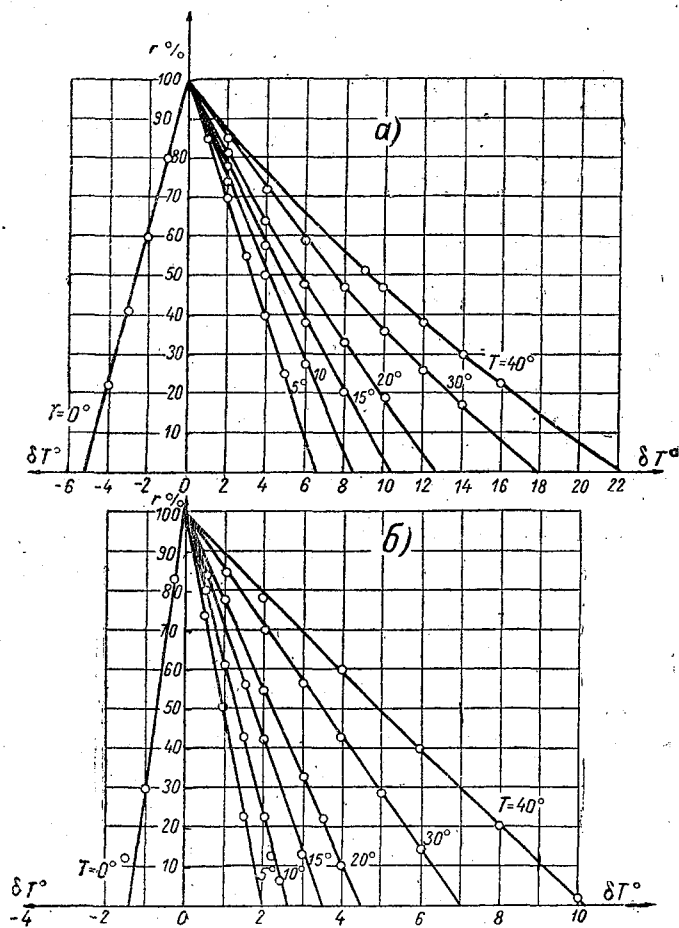


Рис. 1.

а) Психрометр [Августа] $r\% = f(\delta T)_{T = \text{const.}}$ б) Экспериментальный дистанционный психрометр.

Для иллюстрации на рис. 1 а и б приводятся семейства психрометрических характеристик для двух типов психрометров.

Как видно из рис. 1, семейство психрометрических характеристик представляет пучек прямых и слегка искривленных линий, расходящихся из одной точки на оси ординат, соответствующей относительной влажности $r=100\%$, и пересекающих ось абсцисс в различных точках, определяющих наибольшую, при данной температуре T , разность температур между сухим и смоченным термометрами (δT). Для любой точки на кривых $r=f(\delta T)$, величина психрометрической чувствительности опре-

¹ Гидрометеиздат, Л. 1947.

деляется как отношение приращения разности температур ($\Delta \delta T$) к соответствующему приращению относительной влажности ($\Delta r^0/0$). Степень неравномерности чувствительности (K) определяется отношением величин психрометрической чувствительности при максимальной и минимальной температуре T . Для иллюстрации метода оценки качества психрометров с помощью предложенных параметров, приводим табличку значений психрометрических параметров, полученных из характеристик на рис. 1 и 2 (табл. 1).

Таблица 1

Тип психрометра	T°	δT°	α_n град./10%	K
Августа	0	-5,2	0,052	4,3
"	40	22,3	0,223	
Экспериментальный	0	-1,4	0,014	7,1
То же	40	10,2	0,102	

Из табл. 1 ясно, что экспериментальный психрометр значительно уступает по своим психрометрическим качествам психрометру Августа.

Термометрическая чувствительность (α_T) характеризует способность прибора реагировать на разность температур сухого и смоченного термометров и определяется величиной отклонения стрелки прибора индикатора при изменении разности температур двух приемников на 1° , т. е.

$$\alpha_T = \frac{\Delta n}{\Delta \delta T} \quad (7)$$

Величина термометрической чувствительности зависит от выбора приемников температуры и элементов электроизмерительной схемы. Для получения наибольшей возможной величины α_T , необходимо обеспечить оптимальное соотношение между параметрами приемника температуры, элементами схемы и режимом питания моста, что достигается с помощью соответствующих расчетов при конструировании прибора.

Общая чувствительность психрометра определяется как произведение частных чувствительностей:

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_T = \frac{\Delta \delta T}{\Delta r^0/0} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \delta T} = \frac{\Delta n}{\Delta r^0/0} \quad (8)$$

Конкретным примером использования параметров и характеристик психрометра при конструировании прибора является расчет шкалы прибора индикатора дистанционного психрометра, построенного на принципе дифференциального включения двух приемников температуры (сухого и смоченного) в схему моста Уитстона. Основой для построения шкалы такого психрометра являются психрометрические характеристики, подобные показанным на рис. 1 *a* и *б* и вычисленные по ним параметры психрометра для рабочего диапазона температур.

Ввиду того, что относительная влажность является нелинейной функцией двух переменных, шкала прибора индикатора получается многозначной и неравномерной. Шкала эта представляет несимметричную сетку из параллельных прямых, причем на каждой прямой наносится шкала относительной влажности для данной температуры и системы прямых и изогнутых линий, соединяющих точки одинаковой влажности на прямых различных температур. Шкала влажности для каждой температуры наносится

соответственно величинам разности температур (δT), определяемым по психрометрическим характеристикам при данной постоянной температуре (T) для разных величин относительной влажности. По этим разностям температур (δT) определяется психрометрическая чувствительность (α_n) прибора для данной температуры (T) и данной влажности ($r^0/0$).

Умножив затем значения психрометрической чувствительности на соответствующие величины термометрической чувствительности (α_T), получаем общую чувствительность прибора (α) для разных диапазонов температуры (T) и относительной влажности ($r^0/0$), после чего построение шкалы влажностей производится обычным порядком.

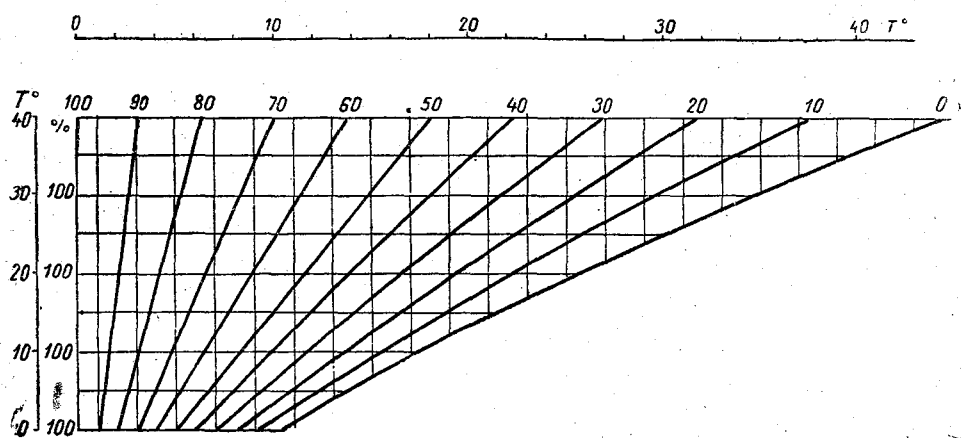


Рис. 2. Шкала дистанционного психрометра.

Изображение такой шкалы для прибора с психрометрическими характеристиками, соответствующими характеристикам психрометра Августа дано на рис. 2.

Система параллельных линий на этой шкале соответствует различным постоянным значениям температур по сухому термометру. Расходящиеся прямые и слегка искривленные линии являются линиями постоянной влажности при различных температурах по сухому термометру. Отсчет величины относительной влажности производится по точке пересечения стрелки прибора индикатора с линией постоянной влажности и прямой соответствующей температуры.

Так как для пользования шкалой влажности необходимо знание температуры окружающего воздуха, то непосредственно над шкалой влажности может быть нанесена шкала термометра сопротивления. В качестве такого термометра, с помощью простых переключений в схеме, может быть использован приемник температур сухого термометра.

МЕТОДИКА МИКРОФОТОГРАФИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ ТУМАНА И ОБЛАКОВ

В настоящее время для измерения размеров капель тумана и облаков чаще всего применяется метод микрофотографирования. Этот метод заключается в следующем. На стеклянную пластинку, покрытую слоем минерального масла, осаждаются капли тумана, которые фотографируются через микроскоп в тот момент, когда они медленно проходят слой масла, долгое время не испаряются и находятся в нем почти во взвешенном состоянии [1]. В зависимости от способа нанесения масла на стекло, а также от способа осаждения капель, метод микрофотографирования имеет несколько разновидностей. Не имея возможности подробно останавливаться на каждой разновидности метода в отдельности, кратко упоминаем некоторые наиболее характерные из них:

1) Нанесение на стекло тонкого слоя жира, на котором капли расплющивались. При обработке микрофотографий вводился коэффициент на расплющивание капель.

2) Нанесение на стекло достаточно толстого слоя касторового масла и осаждение на него капель тумана посредством специального приспособления.

3) Осаждение капель тумана на стекло, покрытое слоем смеси из минерального масла и „американского“ вазелина [2].

4) При микрофотографировании капель облака с самолета, осаждение их на стекло, покрытое двумя слоями масла различной плотности. Капли на поверхности раздела двух масел оставались долгое время во взвешенном состоянии. Пробы капель во время полета брались при помощи специальной установки, напоминающей пистолет, где стекло помещалось позади щелевого затвора и экспонировалось в потоке воздуха с капельками облака в течение $\frac{1}{50}$ сек.

Для выяснения ошибок при взятии пробы капель и выбора наиболее удобного способа осаждения их на стекло, мною были проведены сравнения двух различных способов осаждения капель на стекло, покрытое смесью трансформаторного масла и вазелина. Опыты по сравнению двух способов проводились летом 1939 г. в радиационном тумане на полевой базе Ленинградского института экспериментальной метеорологии в Тосно.

Первый способ осаждения капель на стекло состоял в том, что стеклянная пластинка выставлялась в туман в горизонтальном положении масляной стороной вверх и капли тумана оседали на нее вследствие силы тяжести или от действия ветра [3]. При втором способе воздух с капельками тумана протягивался насосом через специальное приспособление (рис. 1), со скоростью 15—16 м/сек. Стекло, покрытое смесью масел, ставилось под отверстием приспособления и на него осаждались капли тумана, образуя кружок диаметром 5 мм с резко очерченными краями.

Сравнение способов осаждения капель тумана на стекло производилось следующим образом: из ящика вынимались одновременно три стекла, которые устанавливались в горизонтальном положении, и одновременно, пока экспонировались эти стекла, брались три пробы капель тумана посредством приспособления (рис. 1).

Время, в течение которого осаждались капли на стекло, зависело от плотности тумана. Так, для второго способа оно колебалось от 1 до 10 сек., а для простой выдержки стекла от 20 до 180 сек. Больше 3 мин. стекла в тумане не выдерживались по той причине, что капли, попавшие на смесь в начальный момент, могли дойти до стеклянной поверхности и расплываться на ней. Наводка на фокус длилась от 10 до 20 сек., а экспозиция при фотографировании — от $\frac{1}{25}$ до 1 сек.

Результаты сравнения. Обработка микрофотографий показала, что пробы капель тумана, взятые по второму способу, из 56 случаев дали: 66,7% — меньшие размеры капель, 11,6% — равные и 22,2% — большие размеры капель, чем в пробах капель, полученных с горизонтально выставленных стекол в туман. На рис. 2 даны графики повторяемостей (в процентах) размеров капель в зависимости от способа осаждения капель на стекло. Из рис. 2 видно, что хотя графики *а* и *б* по форме сходны между собой, но второй способ дает капли меньших размеров, чем способ осаждения капель на стекла, выставленные в туман.

Во время измерения размеров капель радиационного тумана в Тосно и облачных капель на Эльбрусе в 1940 г. было замечено, что капли быстро осаждаются при ветре на вертикально выставленное стекло, а также при перемещении

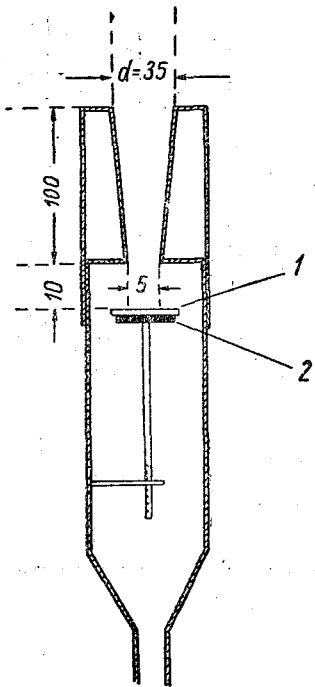


Рис. 1. Схема приспособления для осаждения капель тумана. 1 — предметное стекло, 2 — поднимающийся и опускающийся столик. Размеры в миллиметрах.

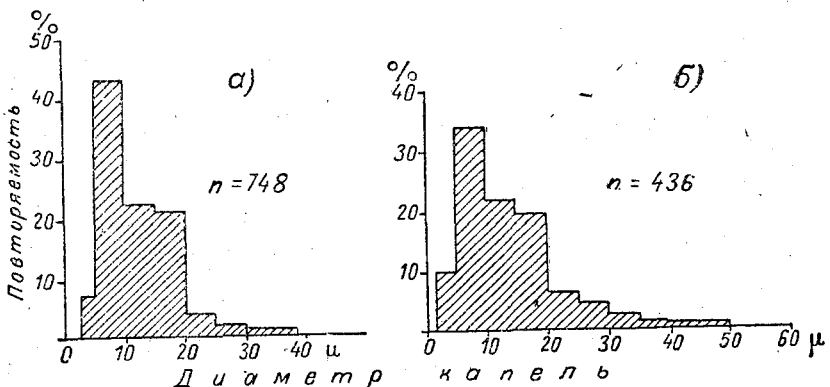


Рис. 2. Размеры капель радиационного тумана.

а) Пробы капель взяты по методу Хагемана. б) Капли тумана осажжены на горизонтально-выставленное стекло. n — число капель. Объектив 40X окуляр 15X. Пробы капель обоими методами взяты одновременно.

стекла во время шторма, когда стекло перемещалось равномерными взмахами при помощи специального держателя (рис. 3). В 1941 и 1946 гг. при

микрофотографировании капель облака с самолета ПО-2 стекло помещалось за шторкой в коробочке. Капли осаждались на стекло, путем открывания шторки на короткий промежуток времени от 0,5 до 2 сек.

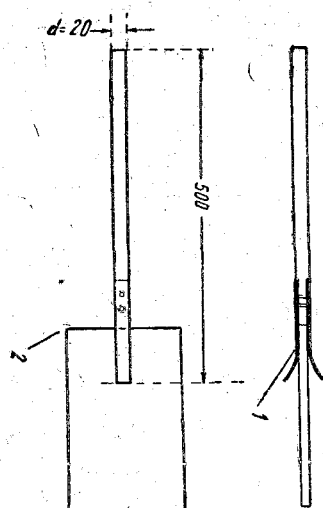


Рис. 3. Задержатель для предметных стекол.

1 — пружины, 2 — предметное стекло 27×57 мм. Размеры в миллиметрах.

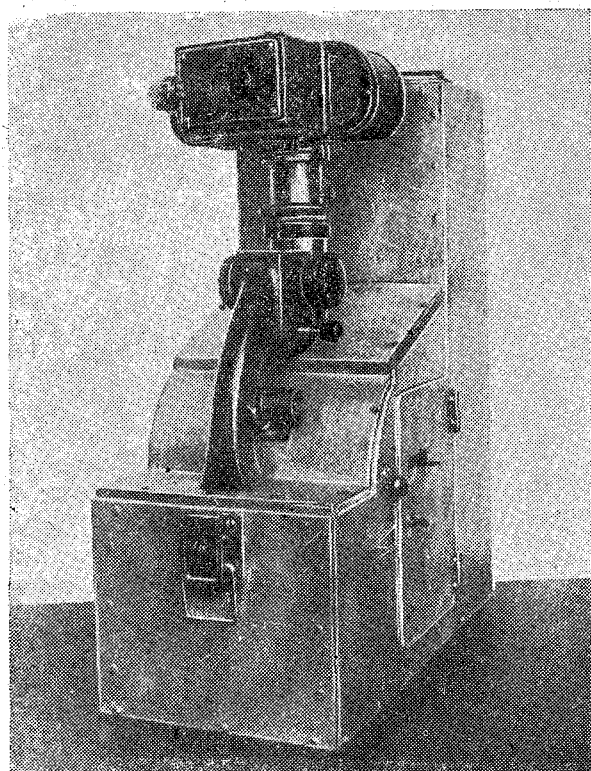


Рис. 4. Микрофотографическая установка конструкции ЛИЭМ.

Обобщая результаты опытов по сравнению способов осаждения капель на стекло, можно отметить, что при измерении размеров капель тумана следует осажда́ть капли на стекло, выставляя или перемещая последнее в тумане. Вторым способом нужно пользоваться лишь при редких туманах и при полетах на аэроста́тах, имея в виду, что этот способ преуменьшает крупные капли в среднем на 15—20%.

Микрофотографирование капель тумана в наземных условиях, а также с аэростата рекомендуется производить микрофотографической установкой конструкции ЛИЭМ (рис. 4). Установка состоит из микроскопа с револьверной головкой для трех объективов, двух осветителей бокового и нижнего, пленочной фотокамеры; ящика для предметных стекол и аккумулятора, питающего лампочки осветителя (2,5 в на 0,5 а). При микрофотографировании капель тумана или облака рекомендуется пользоваться смесью трансформаторного масла с белым „американским“ или „русским“ вазелином в пропорциях, указанных в табл. 1. Можно также пользоваться касторовым маслом, преимущество которого в том, что оно до 12° не требует добавления вазелина.

Смесь масла и вазелина при нанесении на стекло разогревается до 80° и наносится стеклянной палочкой слоем до 0,3 мм. В холодном состоянии смесь наносить не следует потому, что в ней имеются пузырьки воздуха, не отличимые от капель тумана.

Обработка микрофотографий. Фотоснимки капель можно обрабатывать с помощью лупы „ФЭД“, при условии, что на негативе вместе с изображением капель имеется изображение сетки, цена делений которой заранее известна. Этот метод не особенно точен вследствие

небольшого ($6\times$) увеличения лупы. Кроме того при большом количестве капель на негативе их можно легко пропустить или сосчитать 2 раза.

Таблица I

Температура воздуха от до		„Русский“ или „американ- ский“ вазелин в весовых частях	Чистое трансформаторное масло в весовых частях
-40	-25	—	одно масло
-24	-15	1	26
-14	-1	1	12
0	10	1	5
11	19	1	3
20	30	1	2

Наиболее быстрым и удобным способом обработки негативов с изображением капель является проектирование изображений проекционным фонарем или увеличителем „ФЭД“ на экран (матовое, молочное стекло), имеющий миллиметровую сетку. Проектируемые изображения капель измеряются путем подсчета числа делений, укладывающихся в диаметре капли. Каждое измеренное изображение капли зачеркивается восковым карандашом и, таким образом, не может быть подсчитано во второй раз. Этот способ дает возможность обрабатывать микрофотоснимки капель, сфотографированные без микрометрической сетки. Для этого необходимо иметь лишь одну или две фотографии шкалы объектомикрометра, заснятых при той длине тубуса и с тем же окуляром и объективом, при которых производилось микрофотографирование. Во время обработки все нерезкие изображения не должны приниматься в расчет.

Точность измерения размеров капель тумана методом микрофотографирования. При осаждении капель тумана на стекло, покрытое маслом или смесью, мелкие капли могут обтекать стекло вместе с потоком воздуха. Эта ошибка за счет обтекания по видимому небольшая. Если предположить, что мелкие капли, например от 1 до 5 μ , обтекают стекло и не осаждаются в достаточном количестве на масле, то мы не смогли бы никогда получить максимальное количество капель такого размера на кривой распределения. На самом деле это не так. При измерении размеров капель облаков на Эльбрусе в 1940 г. мы получали кривые распределения капель по размерам, где максимум находился от 1 до 5 μ .

Ошибка от испарения. Применяя рекомендуемую нами смесь трансформаторного масла и вазелина, испарением капель со смеси, а также уменьшением диаметра капли за счет растворения воды в смеси, можно пренебречь, так как за период времени (3—4 мин.), требуемый на взятие пробы капель и фотографирование, изменение капель в размере будет очень мало. По нашим наблюдениям при температуре воздуха с 8 до 10° и относительной влажности 65—75%, капли, диаметром 5 μ , находящиеся в смеси, испарились и уменьшили свой размер до 2,5 μ в диаметре за время в 18 час.

Ошибки от слияния капель на поверхности смеси. При осаждении большого количества капель на стекло они могут сливаться друг с другом. Чтобы избежать этой ошибки рекомендуем осажать капли тумана на стекло в небольшом количестве, так чтобы в поле зрения сорокакратного объектива было не больше 70—60 капель различных размеров (рис. 5).

Ошибка при микрофотографировании. Для объектива 40 $\times$ (числовая апертура 0,65) наименьший видимый предмет в микроскоп

в проходящем свете равен $0,42 \mu$ [4]. Рассматривая каплю такого размера в микроскоп через окуляр $15\times$ при длине тубуса 160 мм, мы будем видеть ее изображение в виде кружка диаметром 0,25 мм. Это изображение капли проектируется на фотопленку, находящуюся на расстоянии 68 мм от окуляра, и уменьшается в 3,57 раза. Таким образом сфотографированная через микроскоп капля диаметром $0,42 \mu$ зафиксирована на пленке кружком 0,07 мм в диаметре.

Принимая во внимание ошибку от зернистости пленки можно считать, что при фотографировании через объектив $40\times$ и окуляр $15\times$ будем фиксировать капли диаметром от 1μ и больше. Капля размером в 1μ будет давать отпечаток на пленке в виде кружка, диаметром $\cong 0,2$ мм.

Ошибка от зернистости пленки. Обыкновенная желатиновая эмульсия, применяемая для фотографических пленок и пластинок, имеет размер зерна в поперечнике от 1,5 до 4μ [5] и может фиксировать ши-

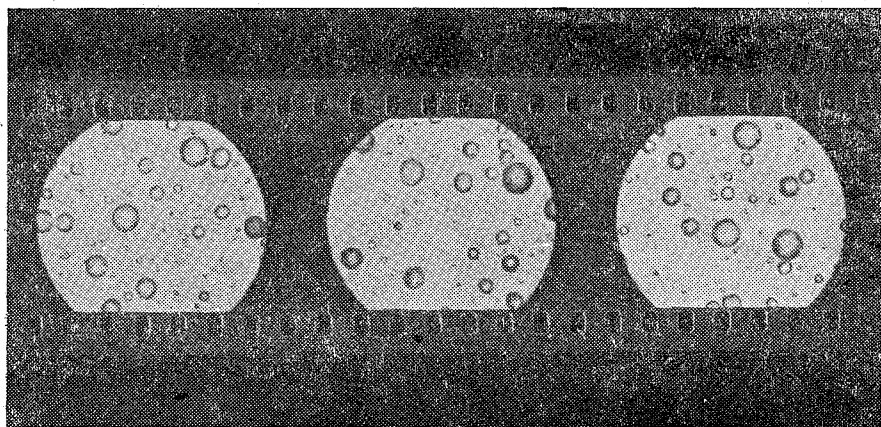


Рис. 5. Капли тумана, осажденные на стекло, в поле зрения сорокакратного объектива. Увеличено в 170 раз.

рину штриха от 0,05 до 0,015 мм. Для фотографирования капель тумана мы применяли пленку, зерно которой равнялось в среднем 3μ и которая фиксировала ширину штриха 0,035 мм. Ошибка в определении размера капли, диаметром $0,42 \mu$, вследствие такой зернистости, будет найдена из следующей пропорции

$$\frac{a}{b} = \frac{100}{x}$$

где a — изображение капли на пленке, b — ширина штриха, фиксируемая пленкой, x — ошибка в процентах; для нашего примера ошибка равнялась $\pm 50\%$.

Таблица 2

Ошибки при фотографировании через микроскоп с объективом $40\times$ и окуляром $15\times$ на негативную пленку со средней величиной зерна 3μ .

Диаметр капель, в μ	1	2	3	5	7	9
Ошибка от зернистости пленки, в $\%$	$\pm 20,59$	$\pm 10,41$	$\pm 7,00$	$\pm 4,16$	$\pm 2,97$	$\pm 2,37$
Ошибка от обработки, в $\%$	$\pm 16,00$	$\pm 8,00$	$\pm 5,33$	$\pm 3,20$	$\pm 2,29$	$\pm 1,98$
Общая ошибка, в $\%$	$\pm 36,59$	$\pm 18,41$	$\pm 12,33$	$\pm 7,36$	$\pm 6,26$	$\pm 4,29$

Ошибка при обработке. При проектировании изображения капель на матовый экран с сеткой, цена деления которой равна $0,32 \mu$, ошибка в определении размеров капель до 10μ в диаметре равнялась половине деления сетки экрана или $\pm 0,16 \mu$; для капель диаметром больше 10μ ошибка составляла одно деление сетки экрана, т. е. $\pm 0,32 \mu$.

Как видно из табл. 2, относительная ошибка уменьшается с увеличением размера капель. Абсолютная ошибка для капель диаметром до 10μ составляет $\pm 0,37 \mu$, а для капель диаметром больше 10μ она увеличивается за счет обработки до $\pm 0,53 \mu$.

Ошибка от неравномерного распределения капель по стеклу. Чтобы получить более полный спектр капель тумана по размерам необходимо, независимо от способа осаждения капель на стекло,

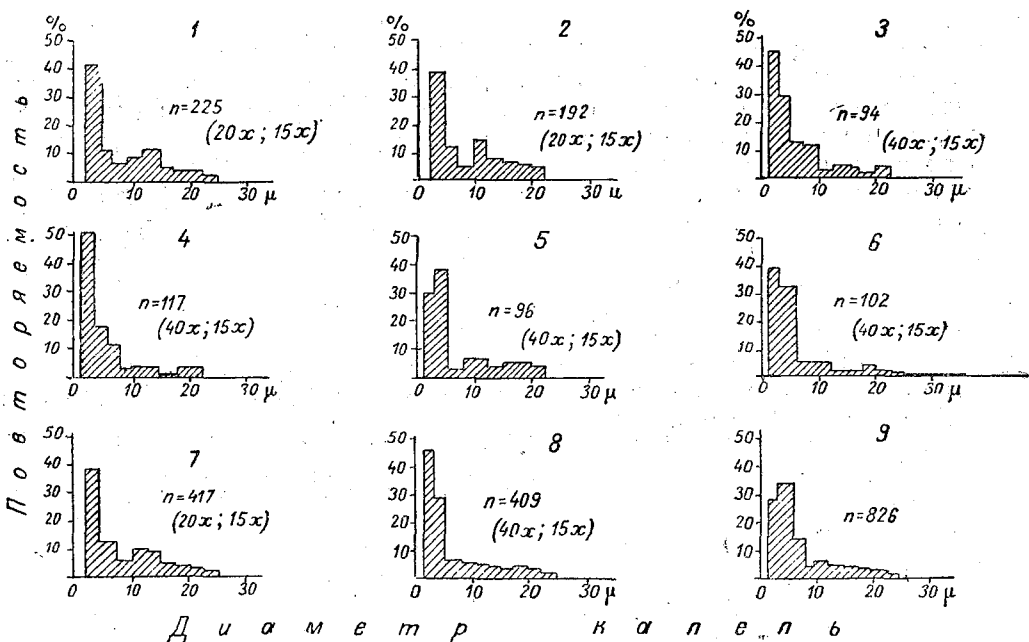


Рис. 6. Графики повторяемости капель по размерам, составленные с разных кадров одной и той же пробы.

n — количество капель. В скобках увеличение объектива и окуляра.

делать не менее трех снимков с разных мест предметного стекла при различном увеличении.

Если фотографирование производится при 600-кратном увеличении, то больше зафиксируется мелких капель, чем при 300-кратном увеличении. Фотографируя от 3 до 6 снимков с каждой пробы, мы можем избавиться от ошибки, получающейся за счет неравномерного распределения капель на стекле, а также зафиксировать не менее 200—400 капель. Малое количество капель, например 40—60 штук, не может дать достаточно полного представления о спектре капель по размерам. В связи с этим уместно рассмотреть несколько графиков повторяемостей капель по размерам, составленных с отдельных кадров одной и той же пробы тумана (рис. 6). В этом случае сделано 6 фотоснимков капель тумана с разных мест предметного стекла.

На рис. 6 каждый из первых шести графиков составлен с одного кадра, причем графики 1 и 2 относятся к снимкам, сделанным через

объектив 20X и окуляр 15X, а 3, 4, 5 и 6 — при объективе 40X и окуляре 15X. График 7 составлен по данным двух фотографий, сделанных при 300-кратном увеличении, а график 8 — по данным четырех фотоснимков при 600-кратном увеличении. Как видно из графиков рис. 6, при 600-кратном увеличении фиксируется мелких капель (до 5 μ) больше, чем при 300X и максимум повторяемости лежит в пределах от 1,5 до 2,5 μ . Для снимков, сделанных при 300-кратном увеличении — максимальное число капель лежит в интервале от 2,5 до 5 μ . График 9 (рис. 6) является общим и отмечает более полное распределение капель по размерам, так как он составлен на основании 826 капель. На нем главный максимум повторяемости не особенно выделяется относительно левой стороны, что говорит о наличии большого числа мелких капель от 1,5 до 2,5 μ . Этот график отмечает и второй небольшой максимум от 10 до 12,5 μ .

Таким образом, применяя метод микрофотографирования, следует учитывать все возможные ошибки, о которых говорилось выше.

В настоящее время метод микрофотографирования является наиболее точным, но он нуждается еще в дальнейшем усовершенствовании, особенно во взятии проб капель.

Было бы желательным иметь возможность непосредственно фотографировать облачные капли, без осаждения их на стекло. В этом направлении сейчас ведутся методические работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оболенский В. И. Курс метеорологии. Гидрометеиздат. 1944.
 2. Фукс Н. Определение размеров капелек в водяных туманах. Журн. Эксперимент-теорет. физ. т. 7, вып. 4, апрель 1937.
 3. Тараян Г. И. К вопросу об определении размеров капель тумана. Труды ЛИЭМ. Вып. 1. 1937.
 4. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Изд. АН СССР. 1937.
 5. Бурмистров Ф. Л. Точная фотография. Оборонгиз. 1939.
-

О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА МЕТОДОМ ШАРОПИЛОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ОДНОГО ПУНКТА

1. Вводные замечания

В настоящее время наиболее распространенным, дешевым и доступным методом измерения ветра является метод шаропилотных наблюдений с одного пункта. В его основу положено допущение о постоянстве вертикальной скорости шара-пилота во время всего подъема. Такое допущение иногда вызывает большие неточности в измерении ветра и ставит под сомнение полученные о ветре данные. Это бывает в тех случаях, когда действительная вертикальная скорость шара-пилота значительно отклоняется от теоретической (табличной), принятой за постоянную.

Естественно возникают вопросы: как велики ошибки измерения ветра методом шаропилотных наблюдений с одного пункта? Когда можно пользоваться этим методом и когда следует прибегать к базисным наблюдениям?

Эти вопросы, конечно, не новы, и аэрологи неоднократно пытались их разрешить. Имеются работы Молчанова, Михайловского, Воронцова и ряда других авторов, в которых вычислялись разности между теоретической вертикальной скоростью шара-пилота и скоростью, полученной базисным методом [1, 2, 3]. Исследовался вопрос точности определения ветра методом однопунктных шаропилотных наблюдений, путем сравнения единичных наблюдений, произведенных этим методом, с базисными наблюдениями [2].

В работе Силинг [4] обработаны уже не единичные случаи, а большое число наблюдений и произведена оценка точности однопунктных наблюдений в Арктике.

Результаты упомянутых работ и нескольких других имеют практическое значение, главным образом, для района, наблюдения которого обрабатывались. В ряде работ давалась качественная оценка ошибок в определении направления и скорости ветра при применении шаропилотных наблюдений с одного пункта и в зависимости от движения шара-пилота [5, 6, 10].

Все эти работы, однако, не сняли с повестки дня вопрос о точности шаропилотных наблюдений с одного пункта, поскольку потребителей данных о ветре прежде всего интересует конкретная величина ошибки и не в вертикальной скорости шара, а в направлении и скорости ветра.

Этим и объясняется, что в 1941 г. в ГГО была поставлена тема о точности однопунктных шаропилотных наблюдений. Для выполнения этой темы предполагалось собрать обширный материал наблюдений не только в ГГО, но и в ряде периферийных обсерваторий.

Поступление материалов, начавшееся в 1941 г. из нескольких районов СССР, было прервано войной, поэтому оценку точности однопунктных

шаропилотных наблюдений можно было провести по наблюдениям нескольких станций, причем только для весеннего периода. Это несколько снижает ценность нашей работы.

Работа не лишена некоторых недостатков еще и вследствие того, что выполнялась в Ленинграде в период самой ожесточенной блокады (ноябрь, декабрь 1941 г.). Полезно было бы работу дополнить и расширить, но это сделать не было возможности, так как основные материалы, по которым строилась работа, не сохранились.

Учитывая многократные запросы о точности шаропилотных наблюдений с одного пункта, автор решил опубликовать полученные им результаты, в надежде, что они в какой-то мере окажутся полезными. Особенно ценным в данной работе представляется то, что можно провести сравнение точности наблюдений над ветром в различных по орографии и климатическим особенностям районах.

К сожалению, различие в методике обработки материалов нашей и Силинг [4] не позволило провести сравнение результатов данной работы с результатами, полученными для арктических районов.

Характеристика материалов наблюдений и методика их обработки

Чтобы определить точность скорости и направления ветра, измеренных тем или иным способом, нужно было бы сравнить значение этих компонент ветра с их истинными значениями. За истинные значения скорости и направления ветра мы взяли результаты наблюдений, произведенные базисным методом.

Разумеется этот метод не лишен как систематических, так и случайных ошибок. Однако ошибки его, безусловно, меньше и хорошо изучены аэрологами [6, 7, 8, 9, 10], а поэтому могут быть учтены.

Для того, чтобы эти ошибки были наименьшими, мы выбрали материалы наблюдений достаточно надежных станций, которые имели богатых опытом наблюдателей и длину базы, обеспечивающую высокую точность наблюдений, по крайней мере до высоты 3—4 км.

В табл. 1 даны основные сведения о станциях, материалы которых использованы нами.

Таблица 1

Название станции	Длина базы, в м	Превышение одного пункта над другим, в м	Азимут базы	Количество наблюдений
Борисполь . . .	1134	2	171,6°	177
Владивосток . . .	764	105	273	151
Тбилиси	1440	60	173	133
Павловск (Слуцк) . . .	1675	25	69	214

На первых трех станциях, входящих в таблицу, наблюдения производились теодолитами Кузнецова. В ГГО 50 наблюдений произведено весной 1941 г. с помощью теодолитов Кузнецова и, кроме того, использованы 164 наблюдения, проведенные летом и весной 1931 и 1932 г. теодолитами Бамберга (Павловск). Наблюдения всюду относятся к обычным срокам. Начальная обработка базисных наблюдений проводилась

в самих пунктах наблюдения. Высоты шара-пилота вычислялись двумя способами: тригонометрически, по формулам базисного метода, и по табличной вертикальной скорости, как это делается при наблюдениях с одного пункта. Дальнейшая обработка в обоих случаях проводилась графически при помощи круга Молчанова.

На местах же были составлены разности:

$$\Delta d = d_s - d_1, \quad \Delta v = v_s - v_1, \quad (1)$$

где d_s и v_s — соответственно направление и скорость ветра, полученные по базисным наблюдениям, d_1 и v_1 — по наблюдениям с одного пункта.

Разности (Δ) были составлены для следующих высот над поверхностью земли: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0 км.

Последующая обработка материалов проводилась в ГГО. Для тех же уровней были подсчитаны средние арифметические отклонения или систематические ошибки:

$$\overline{\Delta v} = \frac{\sum_1^n \Delta v_i}{n}, \quad \overline{\Delta d} = \frac{\sum_1^n \Delta d_i}{n}; \quad (2)$$

затем средние квадратические (включающие в себя и систематические ошибки):

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_1^n \Delta v_i^2}{n}}; \quad \sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n \Delta d_i^2}{n}} \quad (3)$$

и вероятные или срединные ошибки

$$E = 0,674 \sigma \quad (4)$$

Всего было обработано 675 наблюдений.

Так как основным источником ошибок метода однопунктных наблюдений является неточное определение вертикальной скорости шара-пилота, а на последнюю влияет ряд факторов, обуславливающих или характеризующих турбулентность атмосферы, то эти факторы мы и пытались учесть при данном статистическом исследовании.

Имелась возможность учесть следующие факторы: 1) рельеф местности, 2) время наблюдения (суточный ход турбулентности), 3) скорость ветра в нижнем слое атмосферы, 4) вертикальный градиент скорости.

Кроме того, на постоянство вертикальной скорости шара-пилота существенное влияние оказывает размер последнего. При одном и том же состоянии атмосферной турбулентности действие ее на шары различной величины будет различным.

Так как размер шара-пилота определяется номером его оболочки, то шары-пилоты различных номеров рассматривались нами отдельно. Распределение наблюдений по номерам оболочек дано в табл. 2.

Таблица 2

Название станций	Номера оболочек		
	15	20	30
Борисполь	2	157	18
Владивосток	6	145	—
Тбилиси	21	93	19
Павловск (Слуцк)			
1941 г.	—	17	33
Павловск (Слуцк)			
(1931—32 гг.) . . .	—	164	—

Оказалось, что преобладающее число наблюдений было произведено шарами-пилотами с оболочкой № 20. На результатах обработки этих шаров-пилотов мы прежде всего и остановимся.

3. Ошибки в направлении и скорости ветра при наблюдении за шарами-пилотами с оболочкой № 20

В табл. 3 помещены ошибки, вычисленные для каждой станции по наблюдениям шаров-пилотов с оболочкой № 20. Средние арифметические отклонения как для скорости, так и для направления ветра в табл. 3 обозначены буквой a , средние квадратические — σ , вероятные — E , число наблюдений на разных высотах — n .

Рассматривая величины полученных нами ошибок, следует иметь в виду, что в них, кроме ошибок характерных для метода однопунктных наблюдений, входят ошибки графической обработки и ошибки интерполяции высот, свойственные также базисному методу.

Не вдаваясь в детальное определение скорости ветра по слоям атмосферы, возьмем осредненное ее значение и среднюю вертикальную скорость шара-пилота для нижнего слоя атмосферы. Связь между ними выразится простой формулой:

$$v = w \operatorname{ctg} \varphi \quad (5)$$

где v — скорость ветра, w — вертикальная скорость шара-пилота, φ — вертикальный угол, под которым виден шар с места наблюдения.

Очевидно, что ошибка в определении вертикальной скорости шара-пилота приведет к ошибке в скорости ветра того же знака. В нижнем слое атмосферы ошибка вертикальной скорости шара-пилота будет иметь положительный знак, так как в этом слое решающее действие на вертикальную скорость оказывает турбулентность и восходящие потоки воздуха. Оба эти фактора способствуют увеличению вертикальной скорости шара-пилота и последняя становится больше теоретической (принятой за постоянную при обработке шаропилотных наблюдений с одного пункта).

Поскольку при обработке шаропилотных наблюдений с одного пункта занижается величина вертикальной скорости шара-пилота, следовательно, занижается и скорость ветра. Получающаяся при этом ошибка частично погашается в случае увеличения скорости ветра с высотой, так как заниженная скорость ветра относится к ошибочно определенной и тоже заниженной высоте. Зато в случае падения скорости ветра с высотой, ошибка в ее определении сильно возрастает. Следует иметь в виду, что ошибка в скорости ветра определяется не только ошибкой в вертикальной скорости шара-пилота, но еще зависит от определения вертикального угла φ , а точность определения последнего связана не только с точностью измерения вертикальной скорости шара, но и с изменением скорости ветра с высотой. Произведя небольшое преобразование формулы, выведенной Парским [5] для ctg вертикального угла $\varphi + \Delta\varphi$, зафиксированного через промежуток времени t , мы получаем следующее выражение:

$$\operatorname{ctg}(\varphi + \Delta\varphi) = \frac{v + \frac{\Delta w}{w + \Delta w} \delta v}{w + \Delta w} \quad (6)$$

где δv — изменение средней скорости ветра в слое ΔH , остальные обозначения ясны из предыдущего. Из формул (5) и (6) видно, что, при изменении скорости ветра с высотой, точность ее определения будет зависеть еще от величины этого изменения.

Ошибки измерений направления и скорости ветра при наблюдении с одного пункта теодолитом Кузнецова (оболочка № 20)

Март, апрель, май 1941 г.

Высота над поверхностью земли, в км

0,2		0,4		0,6		0,8		1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		4,0		5,0		6,0	
грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек
Владивосток																							
a	0,5	0,1	0,5	0,4	0,6	0,4	0,7	0,6	1,0	1,5	2,4	0,4	2,1	0,2	0,7	0,1	0,7	-0,1	0,3	0,5	1,8	0	—
σ	6	1,5	7	1,5	8	1,7	6	1,3	6	1,4	7	1,7	6	1,5	6	1,3	9	2,7	5	2,0	—	—	—
E	4	1,0	5	1,2	5	1,2	4	0,9	4	0,9	5	1,2	4	1,0	4	0,9	6	1,4	4	1,3	—	—	—
n	145		134		126		117		108		85		62		44		31		21		10		—
Тбилиси																							
a	2,0	1,0	4,1	1,7	1,7	1,3	-0,9	1,2	1,4	0,8	4,7	0,5	0,1	0,6	-4,1	0,1	1,2	0,0	6,8	0,5	1,0	0,1	-1,6
σ	11	2,3	14	4,2	15	3,4	25	2,1	18	2,8	28	2,2	39	1,7	14	1,3	7	1,0	9	1,3	19	1,9	9
E	8	1,5	10	2,8	10	2,3	17	2,1	12	1,9	19	1,5	26	1,2	10	0,9	5	0,7	6	0,9	13	1,3	6,1
n	93		93		90		87		85		65		58		42		39		28		21		21
Борисполь																							
a	-1,6	1,0	-0,3	0,9	0,0	0,9	-0,5	0,6	-1,4	0,9	0,2	0,4	-1,0	0,3	-2,1	0,8	-1,0	0	—	—	—	—	—
σ	6	1,8	7	1,7	8	1,8	8	1,9	11	2,0	8	2,1	7	1,6	8	2,3	6	1,1	—	—	—	—	—
E	4	1,2	5	1,1	6	1,2	6	1,3	6	1,3	5	1,4	5	1,1	6	1,5	4	0,7	—	—	—	—	—
n	157		150		136		118		107		64		30		23		17		—		—		—
Павловск (Слущк)																							
a	3,5	0,9	-1,2	1,1	1,9	1,1	3,4	0,8	2,5	0,5	-7,7	1,0	7,7	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
σ	9	1,7	11	1,7	11	1,9	16	2,0	15	1,1	16	2,0	22	1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E	6	1,1	7	1,1	8	1,3	10	1,3	10	0,7	11	1,3	15	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
n	13		17		15		14		14		13		9		—		—		—		—		—

В случае постоянства скорости ветра по высоте

$$\operatorname{ctg}(\varphi + \Delta\varphi) = \frac{v}{w + \Delta w} \quad (7)$$

и точность его определения, а следовательно и скорости ветра, будет зависеть только от точности определения вертикальной скорости шара-пилота.

В табл. 3 для всех станций до высоты 3 км над поверхностью земли получились систематические ошибки в скорости больше нуля. Это несомненно является результатом того, что в нижнем слое атмосферы истинное значение вертикальной скорости шара-пилота больше ее табличной величины и ошибка, возникающая вследствие этой причины, превалирует над ошибками, возникающими от других причин.

Если во Владивостоке и Борисполе значения систематических ошибок невелики, то нельзя этого сказать относительно Тбилиси, где величина среднего отклонения скорости в нижнем слое атмосферы уже превосходит 1 м/сек.

В более высоких слоях атмосферы (3—5 км) на вертикальной скорости шара-пилота сказываются другие факторы, как-то: уменьшение подъемной силы шара-пилота, изменение коэффициента a , входящего в формулу $w = 60 \pi a \frac{\sqrt{A}}{c}$, определяющую вертикальную скорость. Поэтому на больших высотах возможно изменение знака Δv на обратный, что и наблюдается в табл. 3.

Ошибка в направлении ветра носит более случайный характер, чем в скорости. Она в значительной мере зависит от вращения ветра с высотой. Поскольку при однопунктных наблюдениях ошибочно вычисляется высота шара, то направление ветра относится не к той высоте, на которой оно имелось в действительности. Если высота шара занижена, и при этом было правое вращение ветра с высотой, то возможна ошибка в определении направления ветра положительного знака. Если вращение ветра левое, то знак ошибки может измениться на обратный. В табл. 3 средняя арифметическая ошибка в направлении ветра не имеет устойчивого знака. Величина ее не достигает больших размеров.

Срединные ошибки, полученные в результате обработки всех подъемов шара-пилота с оболочкой № 20, резко выделяются по своей величине в Тбилиси и не дают резких отклонений от допустимой величины ошибки в других пунктах наблюдения.

За допустимую ошибку мы принимаем ту, которая свойственна базисным наблюдениям. Последняя по данным В. М. Михеля [8] на некоторых

Таблица 4

Средние квадратические и вероятные ошибки в скорости и направлении ветра в Тбилиси с учетом систематических отклонений

Высота над поверхностью земли, в км													
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	
	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек	град. м/сек
$\sigma_{\text{и}}$	11 2,1	14 3,8	15 3,1	25 2,9	18 2,7	28 2,1	39 1,6	14 1,3	7,3 1,0	6 1,2	18 1,9	9 1,5	
$E_{\text{и}}$	8 1,4	9 2,6	10 2,1	17 1,9	12 1,8	19 1,4	26 1,1	9 0,9	5 0,7	4 0,8	12 1,3	6 1,0	

уровнях в нижнем слое атмосферы достигает 5° в направлении ветра и 1,2 м/сек. — для скорости. В нашей таблице только Тбилиси дает значительное отклонение срединных ошибок от этих значений.

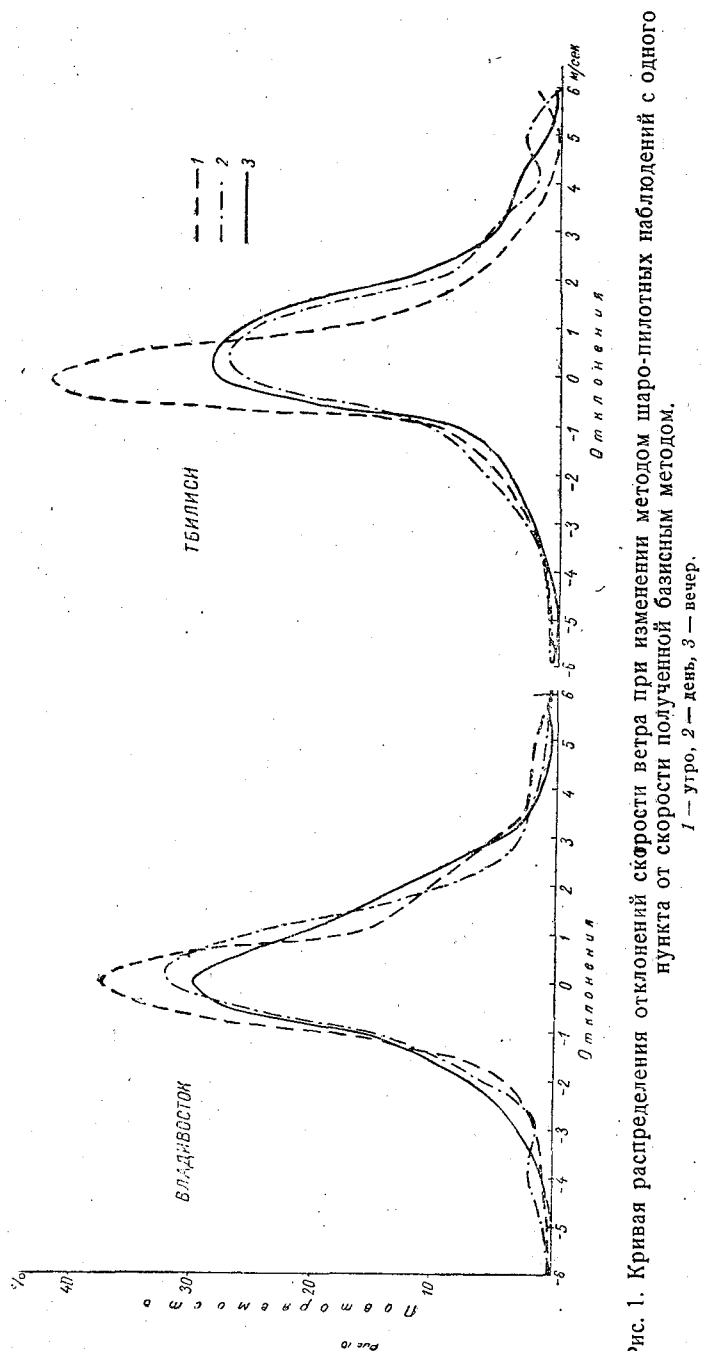


Рис. 1. Кривая распределения отклонений скорости ветра при изменении методом шаро-пилотных наблюдений с одного пункта от скорости полученной базисным методом.

Поскольку наибольшее систематическое отклонение, выраженное средним арифметическим (a), оказалось в Тбилиси, и размеры его как в скорости, так и в направлении ветра, настолько значительны, что пре-

Ошибки в направлении и скорости ветра при измерении методом шаропилотных на

		Высота над							
		0,2		0,4		0,6		0,8	
		град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек
В л а д и									
Утро . . .	α	0,7	0,05	0,3	0,1	0,1	0,1	-1,0	1,0
	σ	4	1,0	7	1,1	4	1,5	5	1,7
	E	3	0,7	5	0,7	3	1,0	3	1,1
	n	41		40		39		36	
День . . .	α	-0,2	0,4	0,8	0,7	2,1	0,6	0,3	0,5
	σ	7	1,8	8	1,9	1,0	1,8	6	1,5
	E	5	1,2	5	1,3	6	1,2	4	0,9
	n	45		42		39		33	
Вечер . . .	α	-0,1	0,1	0,2	0,2	-0,7	0,3	0,3	0,4
	σ	7	1,7	5	1,6	8	1,8	6	1,7
	E	4	1,1	3	1,1	6	1,2	4	1,1
	n	50		48		45		43	
Б о р н с									
Утро . . .	α	-0,8	1,0	-0,8	1,0	2,5	0,8	1,6	1,0
	σ	5	1,6	4	2,0	8	1,6	10	2,2
	E	3	1,1	3	1,3	3	1,1	7	1,5
	n	44		41		36		33	
День . . .	α	-1,2	0,8	1,7	0,7	1,2	0,7	2,0	0,3
	σ	5	1,6	10	1,7	9	2,0	9	1,5
	E	4	1,1	7	1,1	6	1,3	6	1,0
	n	53		52		46		38	
Вечер . . .	α	-2,5	1,1	1,8	1,0	-0,6	1,1	-1,1	1,0
	σ	7	2,1	7	1,5	7	1,6	5	2,1
	E	5	1,3	5	1,0	5	1,1	4	1,4
	n	60		57		54		47	
* Т б н									
Утро . . .	α	3,5	1,7	8,5	0,9	2,2	-0,1	0,6	1,2
	σ	8	1,4	22	3,0	12	3,0	14	3,2
	E	5	0,9	14	2,0	8	2,0	9	2,7
	n	29		29		27		25	
День . . .	α	4,5	1,4	8,6	1,8	6,4	1,5	-3,0	0,9
	σ	16	2,9	16	3,6	20	4,0	40	3,4
	E	11	1,9	11	2,4	13	2,7	27	2,3
	n	23		23		23		22	
Вечер . . .	α	-0,2	1,0	-1,6	1,0	-2,1	1,6	-1,7	1,5
	σ	10	2,6	12	5,8	13	3,5	21	2,7
	E	6	1,8	8	3,5	9	2,4	14	1,8
	n	35		35		34		34	

Таблица 5

людений с одного пункта (шар-пилот с оболочкой № 20) в различное время суток

поверхностью земли, в км

1,0		1,5		2,0		2,5		3,0		4,0	
град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек
З О С Т О К											
1,1	0,4	3,6	0,2	3,7	1,0	-1,4	0,2	-1,0	0,1	-1,3	-0,1
8	1,6	11	1,5	5	1,4	6	1,1	6	2,7	6	1,6
6	1,1	7	1,0	3	0,9	4	0,7	4	1,6	4	1,1
33		29		21		16		12		10	
0,2	0,6	1,0	0,7	2,7	0	0,5	-0,5	1,7	-0,7	1,1	0
5	1,3	7	2,0	8	1,3	5	3,1	12	3,2	4	1,3
3	0,9	4	1,3	5	0,9	4	2,1	8	2,2	3	0,9
31		28		25		16		13		7	
-0,1	0,4	0,3	0,04	1,7	-0,2	0,6	0,3	3,3	-0,3	—	—
6	1,5	6	1,4	5	1,4	4	1,0	5	1,0	—	—
4	1,0	4	0,9	4	0,9	3	0,7	3	0,7	—	—
38		26		15		10		7		—	
П О Л Ь											
-1,4	0,7	-0,2	0,4	-4,0	0,7	0,2	0,5	-0,5	0,8	—	—
7	2,1	4	2,3	9	1,4	1	1,0	3	0,3	—	—
5	1,3	2	1,6	6	0,9	0,8	0,7	2	0,2	—	—
27		18		6		4		4		—	
-0,1	0,5	1,5	0,7	0,3	0,6	-1,2	0,7	-1,3	-0,7	—	—
11	1,7	9	1,6	3	1,5	8	1,4	4	1,1	—	—
7	1,1	6	1,1	2	1,0	5	0,9	3	0,8	—	—
37		23		13		11		7		—	
-2,4	1,1	3,0	1,0	4,5	0,7	-0,4	1,5	-1,0	0,1	—	—
3	2,0	10	2,1	9	1,6	15	3,1	9	1,0	—	—
2	1,3	7	1,4	6	1,1	10	2,0	6	0,7	—	—
43		23		11		8		6		—	
Л И С И											
-5,5	-0,2	3,0	0,4	-4,3	-7,0	-4,8	2,0	1,0	0,4	-1,7	0,1
16	2,7	14	1,0	13	1,4	9	1,0	5	0,2	10	1,3
10	1,8	9	0,7	9	0,9	6	0,7	3	0,1	7	0,3
23		18		14		10		10		6	
-0,3	0,6	-1,9	-0,1	5,1	0,8	-5,3	0,2	10,7	0	6,8	1,0
34	2,9	21	1,9	28	1,9	13	1,3	15	1,0	12	1,2
23	1,9	14	1,3	19	1,3	9	0,9	10	0,7	8	0,8
23		18		15		10		7		5	
6,1	1,3	-10,3	1,3	-22	1,0	-5,0	0,1	-2,0	-0,2	-5,0	1,0
23	3,0	40	3,0	56	1,9	17	1,7	7	1,4	13	1,8
15	2,0	27	2,0	28	1,3	12	1,2	4	1,0	9	1,3
32		25		22		17		16		10	

Ошибки в скорости ветра, в м/сек.

[illegible]

Павловск (Слуцк) — весна и лето — 1931—32 гг.

Май, утро

[illegible]

Лето, утро

α	0,3	-0,08	-0,08	-0,01	-0,1	-0,8	-0,2	-0,1	0,08	-0,04	-0,08	0	-0,2	0,3	0,4
σ	0,9	0,8	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,1	1,4	1,3	2,5	2,1
E	0,6	0,4	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	1,0	0,9	1,7	1,3
z	100	103	103	102	102	96	87	80	70	56	48	43	36	26	19

Лето, день

a	1,1	1,0	1,3	0,8	0,6	0,3	-0,5	0,05	-0,3	0,6	-0,6	0,3	-0,3	-
σ	1,6	1,7	1,9	1,4	1,2	1,1	1,3	1,0	0,8	0,9	1,1	0,9	1,0	-
E	1,1	1,1	1,3	1,0	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	-
z	20	20	21	21	21	20	19	18	18	18	16	16	10	-

небрегать ими при вычислении вероятных ошибок нельзя, мы попытались его исключить по формуле

$$\sigma_n = \sqrt{\overline{\Delta x^2} - (\overline{\Delta x})^2} \quad (8)$$

где x — скорость или направление ветра, $\overline{\Delta x^2}$ — средний квадрат отклонения, $(\overline{\Delta x})^2$ — квадрат среднего отклонения.

Исправленные значения средних квадратических отклонений (σ_n) и средних ошибок (E_n) даны в табл. 4. Они получились все же значительной величины и превосходят значения ошибок базисного метода.

Таким образом введение поправки на систематическое отклонение скорости и направления ветра в Тбилиси не приводит к достаточному повышению точности однопунктных наблюдений.

Рассмотрим теперь ошибки в зависимости от срока наблюдения. Они даны в табл. 5 для утра, дня и вечера.

Ввиду того, что в 1941 г. в Павловске наблюдений было мало, мы использовали для этой цели наблюдения 1931-32 г., производившиеся теодолитом Бамберга и по ним вычислили ошибки в скорости ветра. По остальным станциям были взяты те же самые наблюдения, что и в табл. 3.

На всех станциях в утренние часы ошибки меньше, чем в дневные и вечерние. Наименьшие ошибки во все сроки наблюдений — в Павловске, что повидимому в значительной степени объясняется применением теодолита другой системы, обеспечивающего большую точность наблюдений. В Тбилиси, наоборот, во все сроки наблюдений ошибки больше, чем в других пунктах, что следует отнести за счет сложности рельефа и вследствие этого увеличенной турбулентности. На рис. 1 представлены кривые распределения ошибок измерения скорости ветра в Тбилиси и для сравнения — во Владивостоке. Как во Владивостоке, так и в Тбилиси, если рассматривать отклонения на всех высотах, не выделяя нижний слой атмосферы, в утренние часы ошибки в скорости ветра, повидимому, носят случайный характер. Кривая получается симметричной с максимумом на оси ординат. В дневные и вечерние часы максимумы кривых распределения в Тбилиси смещаются вправо, т. е. значительно сказывается влияние систематической ошибки положительного знака.

4. Ошибки наблюдения при сильном ветре

В табл. 6 даны средние квадратические и вероятные ошибки при большой скорости ветра (> 10 м/сек.) в нижнем слое атмосферы для паров-пилотов с оболочками № 20.

При сильном ветре метод шаропилотных наблюдений с одного пункта дает удовлетворительные данные о направлении ветра, с определением же скорости ветра дело обстоит значительно хуже.

Достаточно сравнить ошибки наблюдения скорости, помещенные в табл. 6, с теми же ошибками в табл. 3, чтобы убедиться, что при сильном ветре ошибки в определении скорости значительно возрастают. В табл. 3 вошли все случаи наблюдения за шарами-пилотами с оболочкой № 20, следовательно и те, когда в нижнем слое атмосферы наблюдался сильный ветер. Если выделить только те наблюдения, когда скорость в нижнем слое атмосферы была меньше 10 м/сек., то разница в величине ошибок получилась бы более значительной. Средняя квадратическая ошибка при сильном ветре в Борисполе и Владивостоке в преобладающем большинстве случаев превышает 2 м/сек. Особенно же она велика

Таблица 6

Ошибки в направлении и скорости ветра при скорости ветра > 10 м/сек.
на высоте 0,2—0,4 км

		Высота над поверхностью земли, в км															
		0,2		0,4		0,6		0,8		1,0		1,5		2,0		2,5	
		град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек	град.	м/сек
Борисполь																	
σ		4	2,2	4	2,3	4	2,1	3	3,1	4	3,2	5	4,5	6	3,0	—	—
E		3	1,5	3	1,6	3	1,4	2	2,1	3	2,2	4	3,0	4	2,0	—	—
n		36		35		33		28		20		7		2		—	
Владивосток																	
σ		3	1,6	3	2,2	4	2,2	3	2,1	5	1,8	7	1,9	6	2,0	4	1,9
E		2	1,1	2	1,5	3	1,4	2	1,4	3	1,2	4	1,3	4	1,3	3	1,3
n		50		46		44		36		32		23		18		11	
Тбилиси																	
σ		6	4,9	7	9,9	11	8,1	16	8,4	18	6,1	28	6,6	67	3,3	24	1,8
E		4	3,3	5	6,7	8	5,5	11	5,7	12	4,1	19	4,5	46	2,2	16	1,2
n		14		14		12		12		10		5		5		3	

в Тбилиси. Здесь даже срединная ошибка может превышать 6 м/сек. Правда, число наблюдений при сильных ветрах в Тбилиси очень невелико.

Результаты сравнения двух методов наблюдения ветра при больших значениях его скорости приводят к убеждению, что определение больших скоростей ветра при однопунктных наблюдениях шара-пилота нельзя считать удовлетворительным. Это убеждение подкрепляется данными, полученными В. М. Михелем. Приведем составленную им таблицу по результатам шаропилотных наблюдений за несколько лет (табл. 7). По наблюдениям ряда станций В. М. Михель отобрал такие подъемы шаров-пилотов, когда скорость ветра у поверхности земли (по флюгеру) превышала 8 м/сек., затем составил разности между скоростью ветра по флюгеру и на высоте 0,1 км над поверхностью земли:

$$\Delta v = v_{0,1} - v_{\phi}$$

Из 176 разностей 69 получены в результате базисных наблюдений и 107 по наблюдениям шара-пилота с одного пункта.

Распределение разностей в зависимости от знака при двух методах наблюдения оказалось следующим (табл. 7):

Таблица 7

	Шаропилотные наблюдения с 1 пункта		Базисные шаропилотные наблюдения	
	число случаев	%	число случаев	%
$\Delta v > 0$	11	10	41	59
$\Delta v < 0$	96	90	28	41

Хотя приведенные в табл. 7 наблюдения подобраны совершенно случайно (лишь бы скорость ветра у земли превышала 8 м/сек.) все же, олучившееся процентное соотношение между случаями роста скорости ветра с высотой и ее убыванием при двух методах наблюдения указывает на необходимость критического подхода к результатам определения скорости сильного ветра при однопунктных наблюдениях.

Нередко, при сильном ветре у поверхности земли, синоптик все же рекомендует летчику совершать полет, заверяя, что выше атмосфера спокойнее, так как скорость ветра с высотой падает. Нельзя не согласиться

В. М. Михелем, что предполагаемое падение скорости ветра с высотой в некоторых случаях может оказаться заблуждением, вызванным неточностью метода измерения ветра, и что последствия его могут быть весьма неприятными для самолета, особенно при наличии низкой облачности.

Однако, следует заметить, что при наличии сильного ветра у поверхности земли понижается точность определения его скорости по флюгеру, а также и с помощью базисного метода. Поэтому результаты однопунктных наблюдений ветра нельзя отвергать, как заведомо неверные, но если возможно, то в этих случаях следует заменять их базисными наблюдениями.

В табл. 8 приводятся ошибки в определении скорости ветра при быстром росте скорости в нижнем слое атмосферы, когда градиент скорости не меньше 2 м/сек. на 100 м высоты.

Таблица 8

Ошибки в определении скорости ветра при градиенте скорости ≥ 2 м/сек. на 100 м в нижнем слое атмосферы (0—0,2 км)

Высота над поверхностью земли, в км						
	0—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8	0,8—1,0	
Борисполь						
σ	5,9	3,2	0,3	4,3	0,2	
E	4,0	2,2	0,2	2,9	0,1	
n	59	17	4	6	2	
Владивосток						
σ	5,7	1,0	3,1	2,1	1,6	
E	3,8	0,7	2,1	1,4	1,1	
n	36	10	9	4	3	

Величина срединной ошибки, достигающая 4 м/сек. в слое с большим градиентом скорости, свидетельствует о том, что, измеряя ветер в этих случаях, мы получаем весьма приближенные значения его скорости.

Малое число наблюдений за шаром-пилотом с оболочкой № 15 не позволяет сделать окончательных выводов. Все же кажется очевидным, что ошибки измерения ветра будут не больше, а скорее меньше, чем при наблюдении шара-пилота с оболочкой № 20. Даже в Тбилиси, где больше, чем на других станциях наблюдались такие шары-пилоты, ошибки в скорости получились близкими к допустимым, т. е. неизбежным при базисных наблюдениях, хотя здесь условия наименее благоприятны для применения однопунктных наблюдений.

Ошибки в направлении ветра в отдельных случаях все же значительны (см. табл. 9).

Таблица 9

Ошибки в направлении и скорости ветра, при наблюдении с одного пункта шара-пилота с оболочкой № 15

Высота над поверхностью земли, в км											
0,2		0,4		0,6		0,8		1,0		1,5	
град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек	
град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек	
град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек		град. м/сек	

Владивосток

a	-3,8	1,0	-11,7	1,5	-0,1	1,0	-2,3	0,5	1,0	0,3	2,5	0,2	—	—	—	—
σ	8	1,4	14	2,5	3	1,1	4	1,4	8	1,1	10	1,5	—	—	—	—
E	5	0,9	9	1,7	2	0,7	3	0,9	5	0,7	7	1,0	—	—	—	—
n	6		6		6		6		6		4		—			—

Тбилиси

a	3,1	0,8	-1,6	0,3	0,05	0,05	2,0	0,2	0,1	0,4	3,0	0	11,1	0,0	2,8	1,3	-1,5	-0,2
σ	6	1,8	8	1,5	9	1,6	9	1,9	9	1,4	14	0,2	34	1,2	23	3,1	11	0,1
E	4	1,2	5	1,0	6	1,1	6	1,3	6	0,9	9	0,1	23	0,8	16	2,1	7	0,1
n	21		20		21		21		19		14		10		6		4	

Ошибки в направлении и скорости ветра при наблюдении с одного пункта шара-пилота с оболочкой № 30

Высота над поверхностью земли, в км													
0,2		0,4		0,6		0,8		1,0		1,5		2,0	
грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек
8,0		7,0		6,0		5,0		4,0		3,0		2,5	
грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек	грав.	м/сек

Павловск (Служк)

a	-3,0	-1,0	-2,4	-1,9	-4,9	1,2	-4,1	1,3	2,1	1,4	-2,6	-1,1	3,1	1,0	2,7	0,7	4,2	0,7	5,2	0,8	-0,5	-0,2	3,4	0,5	1,7	0,3	3,4	1,1
σ	6	1,5	9	6	2,2	1,5	1,7	1,7	1,6	2,2	2,2	1,9	1,2	2,0	1,1	2,0	1,8	2,1	1,3	2,4	1,2	1,7	1,3	3,5	1,0	3,5	1,4	4,8
E	4	1,0	6	1,5	10	1,2	8	1,2	10	1,5	15	1,3	8	1,3	8	1,3	12	1,4	8	1,6	8	1,2	9	2,4	7	2,4	9	3,2
n	29		31		32		33		33		33		33		33		32		31		28		27		24		18	

Борисполь

a	-5,7	1,1	2,0	1,0	7,0	1,0	5,2	0,5	1,4	0,8	0,8	0,8	1,6	1,4	1,9	0,8	-4,8	0,9	-3,6	0,3	-3,2	1,5	-1,8	0	0,5	-1,8	0,7	-2,2
σ	25	1,5	10	1,8	15	1,7	11	1,8	9	2,6	17	2,3	3,6	2,2	2,4	2,2	9	1,9	14	2,0	11	3,5	18	4,8	8	6,8	3	6,1
E	17	1,0	7	1,2	10	1,0	8	1,2	6	1,8	11	1,6	2,4	1,5	1,6	1,4	6	1,3	10	1,3	7	2,4	12	3,2	5	4,6	2	4,1
n	18		18		18		17		17		15		15		15		15		13		8		7		6		4	

Тбилиси

a	-1,6	1,1	3,4	1,1	-10,6	1,3	-3,8	1,3	4,1	1,6	-0,6	1,0	-3,1	0,7	-1,1	0,1	-17,5	1,0	13,5	0,5	12,0	-1,0	-2,2	-0,9	-5,9	-0,3	-1,5	0,9
σ	8	2,3	17	2,5	47	2,3	50	3,8	55	3,7	57	3,3	4,2	2,1	2,9	2,5	26	2,5	41	1,8	37	2,4	3,5	2,5	4,3	3,3	10	3,1
E	6	1,5	11	1,7	32	1,5	34	2,6	37	2,5	38	2,2	2,7	1,4	1,9	1,7	18	1,7	28	1,2	25	1,6	2,4	1,7	2,9	2,2	6	2,1
n	19		19		19		19		19		17		18		19		17		17		16		16		14		14	

Как правило, большие шары-пилоты (оболочка № 30) выпускались при тихой ясной погоде, и если при этих условиях срединные ошибки в скорости превосходят 1 м/сек., а по табл. 10 они значительно превосходят эту величину, то результаты измерений ветра нельзя считать удовлетворительными.

При обработке наблюдений за шаром-пилотом с оболочкой № 30 его теоретическая вертикальная скорость, согласно инструкции, вычислялась по формуле Хессельберга и Биркелянда

$$w = 60 \pi a \frac{\sqrt{A}}{C} \quad (9)$$

причем из таблицы Хессельберга и Биркеланда бралась наибольшая величина коэффициента a , равная 19,4. Тем самым полагалось, что для любой подъемной силы большей 240 г коэффициент a остается неизменным и равным 19,4.

Результаты обработки наблюдений показывают, что такая экстраполяция коэффициента a для большой подъемной силы неверна.

Использование больших оболочек шаров-пилотов для измерения ветра будет ценно в том случае, если можно получить достаточно точные данные о ветре на больших высотах, чем при наблюдении шаров-пилотов с меньшими оболочками. Однако, в данном случае требуемая точность измерения на больших высотах не достигается. Ошибки вызываются рядом причин, влияющих на движение шара. Коэффициент a уже не будет являться постоянной величиной для всех высот, ибо меняется подъемная сила и действует ряд других причин, которые не играют существенной роли при малых размерах шара.

Таким образом при выпуске больших шаров-пилотов следует рекомендовать базисный метод наблюдения или внести коррективы в формулу, определяющую вертикальную скорость шара-пилота.

ВЫВОДЫ

Несмотря на ограниченность, имевшихся в нашем распоряжении статистических данных, нам кажется возможным сделать следующие выводы:

1. Совершенно очевидно, что нельзя ставить вопрос о точности однопунктных шаропилотных наблюдений над ветром в общем виде, а лишь применительно к определенному заданному пункту наблюдения, при этом должны быть известны общие черты ветрового режима в свободной атмосфере над этим пунктом.

2. Ошибки исследуемого нами метода как в скорости, так и в направлении ветра, незначительны, при применении его в условиях равнинной местности при слабой турбулентности атмосферы (в утренние часы) и при отсутствии резких поворотов ветра с высотой. При этих условиях ошибки метода однопунктных шаропилотных наблюдений при использовании шаров-пилотов малого размера близки к ошибкам базисного метода; эти ошибки определяются главным образом точностью наблюдений и их обработки и в меньшей мере допущением постоянства вертикальной скорости с высотой.

3. Допущение постоянства вертикальной скорости шара-пилота оказывает большее влияние на определение скорости ветра в дневные часы, однако же при умеренном ветре возникающие при этом ошибки не настолько велики, чтобы считать однопунктные шаропилотные наблюдения совершенно непригодными.

4. Нельзя пользоваться однопунктными шаропилотными наблюдениями над ветром в районах со сложным рельефом местности. В таких районах

(Тбилиси) по однопунктным шаропилотным наблюдениям получаются весьма сомнительные данные как о скорости, так и о направлении ветра.

5. Независимо от рельефа местности точность измерения скорости ветра при однопунктных наблюдениях значительно понижается при сильном ветре, направление же ветра определяется точнее. Ошибки определения скорости также возрастают при большом вертикальном градиенте скорости и особенно при отрицательных его значениях. При сильном ветре и быстром изменении его с высотой понижается и точность базисных наблюдений, однако все же в этих случаях базисные наблюдения следует рекомендовать вместо однопунктных.

6. При измерении ветра с помощью больших шаров-пилотов (оболочка № 30) лучше применять базисный метод наблюдения. Применение же однопунктных наблюдений за большими шарами-пилотами может дать удовлетворительные данные о ветре в том случае, если формулу Хессельберга-Биркеланда уточнить, введя соответствующий поправочный множитель для определения вертикальной скорости шаров-пилотов, подъемная сила которых превышает 240 г. Определить его можно на основании эмпирических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловский Н. Некоторые результаты базисных определений вертикального движения шаров-пилотов. Труды Аэрологической обсерватории. 1920.
2. Молчанов П. Некоторые результаты базисных наблюдений за движением шаров-пилота. Мет. вестник, № 3. 1925.
3. Воронцов П. А. Вертикальная скорость шаров-пилотов по наблюдениям в Зап. Грузии. Мет. и гидр., № 7, 1938.
4. Силинг М. И. Шаропилотные наблюдения с одного и с двух пунктов. Проблемы Арктики, № 7—8. 1940.
5. Парский Н. Д. Ошибки в скорости и направлении ветра, получаемые вследствие отклонений в вертикальных скоростях шаров-пилотов при наблюдении с одного пункта. Журн. Геофизики, вып. V, 1935.
6. Молчанов П. А. Методы исследования свободной атмосферы. Военмориздат, 1941.
7. Михель В. М. Об ошибках базисных шаропилотных наблюдений. Труды НИУ ГУГМС. Сер. I, вып. 19. Гидрометеиздат, 1946.
8. Михель В. М. Исследование точности шаропилотных теодолитов различных систем путем визирования неподвижных объектов. См. стр. 19 данного издания.
9. Зайчиков П. Ф. Точность тригонометрического определения высоты шара-пилота. Труды НИУ ГУГМС. Сер. I, вып. 19 Гидрометеиздат.
10. Dietzius R. Über die Sicherheit der trigonometrischen bestimmten Ballonhöhen und verticalen Geschwindigkeiten. Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. Bd. 5. 1913.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
С. И. Соколов. Ошибки гребенчатого радиозонда в слое инверсии температуры	3
В. М. Михель. Ошибки нерепрезентативности измерения ветра на высоте по единичным шаропилотным наблюдениям	10
В. М. Михель. Исследование точности шаропилотных теодолитов различных систем путем визирования неподвижных объектов	19
В. Д. Третьяков. К методике измерения температурного градиента в призем- ном слое воздуха	29
Л. С. Яковлева. К вопросу о параметрах, характеристиках и шкале дистанцион- ного психрометра	35
В. А. Зайцев. Методика микрофотографирования капель тумана и облаков . . .	40
М. В. Заварина. О точности измерения ветра методом шаропилотных наблю- дений с одного пункта	47



Редактор *В. Н. Кедровский*.

Техн. редактор *Л. Б. Кононова*.

Сдано в набор 18/III 1948 г. Подписано к печати 10/VI 1948 г. Индекс М-Л-58.
Изд. № 58. Формат бумаги 70 × 105¹/₁₆ см. Зн. в 1 печ. л. 70 000. Печ. л. 4. Уч.-изд. л. 6,6.
Тираж 600 экз. Заказ № 463. Гидрометеоздат, г. Ленинград 1948 г. М-15518

Цена 6 руб.

2-я Типо-литография Гидрометеоздата, Ленинград, Прачечный пер., 6.