

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ЗАГОТОВОК СССР

ЦЕНТРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

ПРОВЕРЕНО
1950г.

Т Р У Д Ы
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ
имени А. И. Воейкова

ВЫПУСК 38 (100)

Под редакцией
канд. физ.-мат. наук
М. П. ТИМОФЕЕВА

БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1953

АННОТАЦИЯ

В сборнике помещены статьи, посвященные аэрологическим исследованиям приземного слоя атмосферы; в них включены как результаты измерений, так и разработка новых приборов.

Ряд статей посвящен вопросам исследования структуры воздушного потока в нижнем слое атмосферы, в частности над лесными полосами, при помощи приборов, поднимаемых на привязном аэростате и на самолете.

Приведены вычисления коэффициентов турбулентности в различных географических пунктах по шаропилотным наблюдениям и даны некоторые характеристики инверсий снеготаяния.

Большое внимание уделяется аэрологическим приборам по исследованию приземного слоя — аэростатному метеорографу и прибору по измерению микроструктуры ветра.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
П. А. Воронцов. Исследование порывистости ветра над лесными полосами . . .	3 ✓
М. П. Чуринова. Опыт вычисления коэффициента турбулентности в различных пунктах по шаропилотным наблюдениям	15
П. А. Воронцов. Некоторые результаты исследований микроструктуры ветра в нижнем слое атмосферы	22 ✓
И. И. Честная. Об инверсиях снеготаяния	35
П. А. Воронцов. Методика и аппаратура аэрологических исследований микроструктуры ветра, применяемые в ГГО	40 ✓
П. А. Воронцов и В. И. Селицкая. Аэростатный метеорограф	53
И. С. Ермакова и И. Г. Ермолаева. Опыт лабораторного исследования аэростатного метеорографа	72

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРЫВИСТОСТИ ВЕТРА НАД ЛЕСНЫМИ ПОЛОСАМИ

Летом 1951 г., во время работ комплексной экспедиции Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в Каменной Степи, Воронежской области, были проведены исследования порывистости ветра над степью и массивом лесных полос с помощью самолета ПО-2. Площадь, занятая лесными полосами в Каменной Степи, составляла около 20 км². Эту площадь самолет пролетал за 3—5 мин., и поэтому сравнительно легко был проведен ряд одновременных наблюдений за особенностями структуры воздушного потока как над лесными полосами, так и над степью.

Исследования проводились двумя методами:

- 1) отметкой бортаэрологом степени болтанки самолета по стандартной четырехбалльной шкале;
- 2) регистрацией перегрузок, испытываемых неуправляемым самолетом при горизонтальном полете.

Как известно, причиной болтанки самолета являются атмосферные вихри различной интенсивности, соизмеримые с размерами самолета. Основное влияние на полет самолета оказывают резкие изменения вертикальной составляющей воздушного потока. Пересечение мелких вихрей, в основном конвективного происхождения, не отражается на режиме полета.

Болтанка самолета по наблюдениям бортаэролога

При определении болтанки бортаэролог пользовался стандартной шкалой оценки:

Отсутствие болтанки	0 баллов
Слабая болтанка	1 балл
Умеренная болтанка	2 балла
Сильная болтанка	3 "
Очень сильная болтанка	4 "

В Каменной Степи принята следующая схема полета: самолет летал по горизонтали на высотах 100, 200, 300, 500, 1000, 1500 и 2000 м, пересекая участки степи и массива лесных полос. Бортаэролог отмечал степень болтанки самолета и характер подстилающей поверхности, над которой в данный момент находился самолет. Полеты по горизонтали с пересечением массива лесных полос совершались как по ветру, так и против ветра. Как показал анализ материалов, различий в условиях болтанки в зависимости от направления ветра по отметкам бортаэролога почти не было, и поэтому в этой главе разделения полетов по ветру и против ветра не сделаны.

Хотя субъективная оценка интенсивности болтанки самолета может дать только самые грубые качественные представления об особенностях структуры воздушного потока, все же полученные материалы позволяют сделать некоторые заключения.

Всего за период работы экспедиции (с 25/VI по 25/VII) было сделано 247 записей условий полета в слое от 0,1 до 2,0 км, из них 124 отметки относились к полету над степью и 123 — над лесными полосами. Из этого количества

111 отметок указывало на спокойные условия полета, т. е. на отсутствие всякой болтанки, при 102 наблюдениях была болтанка интенсивностью в 1 и 2 балла, и только 34 наблюдения относились к болтанке интенсивностью в 3—4 балла. Спокойные условия полета над лесными полосами были 45 раз, болтанка интенсивностью в 1—2 балла над степью — 48 раз, а над лесными полосами — 54 раза, и, наконец, болтанка интенсивностью в 3—4 балла наблюдалась над степью 9 раз, а над лесными полосами — 25 раз.

От общего числа наблюдений над степью болтанка была в 42⁰/₀, а над лесными полосами — в 59⁰/₀.

Таким образом, уже из приведенных величин видно, что массив лесных полос оказывает значительное влияние на структуру воздушного потока, вызывая в нем усиление порывистости.

Полеты обычно начинались рано утром — еще при наличии приземной инверсии и слабом ветре, поэтому болтанка в это время отсутствовала или была слабой. В утренние часы спокойные условия полета наблюдались над степью 31 раз, а над лесными полосами — 19 раз, причем в слое от 1 км и выше спокойные условия полета наблюдались над степью 12 раз, а над лесными полосами — 9 раз. В дневные часы (от 8 до 18 час.) спокойные условия полета наблюдались над степью при 30 полетах, из них в 16 случаях в слое от 1 км и выше. Над лесными же полосами из 25 полетов 16 было в слое от 1 км и выше. Десять случаев отсутствия болтанки в дневные часы над лесными полосами в большинстве приходится на начало срока и только в двух полетах — на полуденные часы. Разбор их сделан ниже. Сводные результаты условий полета над степью и лесными полосами на разных уровнях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия полета над степью и лесными полосами

Высота, км	Время суток	Степь					Лесные полосы				
		Баллы			Повторяемость болтанки, 0/0	Число случаев	Баллы			Повторяемость болтанки, 0/0	Число случаев
		0	1—2	3—4			0	1—2	3—4		
0,1	Утро . . .	100	—	—	57	6	40	60	—	83	5
	День . . .	23	70	7		13	14	65	21		14
	Вечер . . .	25	75	—		4	—	100	—		4
0,3	Утро . . .	86	14	—	59	7	44	28	28	80	7
	День . . .	29	59	12		17	18	55	27		18
	Вечер . . .	20	80	—		5	—	100	—		5
0,5	Утро . . .	100	—	—	48	7	100	—	—	64	5
	День . . .	46	23	31		13	31	15	54		13
	Вечер . . .	—	100	—		5	—	100	—		5
1,0	Утро . . .	100	—	—	41	8	71	—	29	52	7
	День . . .	43	43	14		14	39	33	28		15
	Вечер . . .	40	60	—		5	40	60	—		5
1,5	Утро . . .	100	—	—	30	2	100	—	—	30	2
	День . . .	60	40	—		5	60	40	—		5
	Вечер . . .	67	33	—		3	67	33	—		3
2,0	Утро . . .	100	—	—	10	2	100	—	—	10	2
	День . . .	100	—	—		5	100	—	—		5
	Вечер . . .	67	33	—		3	67	33	—		3

В графе „Баллы“ табл. 1 нуль указывает на полное отсутствие болтанки, графа „Повторяемость болтанки“ получена за все сроки как отношение числа

случаев с болтанкой к общему числу наблюдений на данной высоте и выражена в процентах. Все наблюдения разделены на три срока: утро — до 8 час., день — от 8 до 18 час. и вечер — после 18 час.

В дневные часы как над степью, так и над лесными полосами в слое до 1 км преобладает умеренная и сильная болтанка, причем повторяемость ее над полосами значительно выше и только к уровню 1,5 км эти различия исчезают. Характерно, что максимальная повторяемость сильной болтанки как над степью, так и над лесными полосами приходится на уровень 0,5 км, а не вблизи земной поверхности, причем над лесными полосами до уровня 1,0 км повторяемость сильной болтанки выше, чем над степью. Умеренная болтанка чаще всего наблюдается вблизи земной поверхности.

Если взять повторяемость всех видов болтанки за все сроки, то над полосами максимум ее приходится на нижние 100 м, а над степью — на уровень 300 м. В летнее время над Каменной Степью болтанка может наблюдаться до высоты 1,5 км. На уровне 2,0 км при отсутствии облаков болтанка практически уже отсутствует. Следует отметить, что большая часть самолетных подъемов совершалась при наличии засухи на земной поверхности, с величинами вертикального температурного градиента около $1^\circ/100$ м и даже часто выше $1^\circ/100$ м в слое до 1,5—2 км. Термические условия в этот период приведены в работе автора [1].

Н. З. Пинус [2] отмечает, что при значительных вертикальных градиентах температуры слабая болтанка самолета имеет место, повидимому, в слоях со сравнительно небольшим возрастанием скорости ветра. В Каменной Степи при полете 27/VI в 14 час. 20 мин. было отмечено во всех слоях до высоты 1 км отсутствие болтанки как над степью, так и над лесными полосами. Величина вертикального температурного градиента в слое от земли до 1 км была $1,2^\circ/100$ м. Таким образом, создавались условия, благоприятные для сильной турбулентности. Температура и скорость ветра в это время распределялись следующим образом:

Высота, км	0,1	0,5	1,0	2,0
Направление, град.	225	232	223	262
Скорость, м/сек.	3	3	3	3

Как видно из этих данных, в слое до 2 км сохранялось постоянство скорости ветра при малых ее величинах.

4/VII в 11 час. на высоте 1,0 км отмечена очень сильная болтанка — пилот даже потерял управление самолетом. В это время на высоте 1,5 км была нижняя граница мощнокучевой облачности и самолет попал в восходящий поток, образовавшийся под облаками.

Весьма важной для практических целей является величина коэффициента турбулентного обмена и ее распределение с высотой. Величина коэффициента турбулентного обмена определяется в первую очередь вихрями больших размеров — таких, которые вызывают и болтанку самолета. Следовательно, можно сделать вывод, что турбулентный обмен над лесными полосами интенсивнее, чем над степью, причем в нижнем слое 100—200 м эта разница наибольшая и полностью исчезает к высоте 1,0 км.

Для более полной объективной оценки болтанки самолета бортаэрологу необходимо записывать величины вертикальных скоростей самолета по вариометру и иметь более точное определение высоты по специальному высотомеру, рассчитанному всего до 4—5 км, а также применять секундомер, — тогда возможно получать максимальные размеры бросков вверх и вниз, размеры преобладающих бросков, частоту их в единицу времени и вертикальные скорости самолета.

Для летнего периода, на основании отметок степени болтанки самолета, можно сделать некоторые выводы по Каменной Степи.

1. Воздушный поток при переходе со степи на массив лесных полос, как правило, деформируется и порывистость его возрастает.

2. Деформации воздушного потока, вызванные лесными полосами, могут иногда доходить до высоты 1—1,5 км.

3. Над степью повторяемость болтанки сначала возрастает до уровня 300 м, а затем уменьшается; над лесными полосами наибольшая повторяемость отмечена внизу на уровне 100 м, а выше уменьшается.

4. Самолет иногда отмечает спокойные условия полета в дневные часы над степью и лесными полосами, если в слое 1—2 км наблюдаются постоянные скорости ветра не более 2—3 м/сек.

5. Величина коэффициента турбулентного обмена в нижнем слое атмосферы над лесными полосами больше, чем над степью. Наибольшая разница в величинах турбулентного обмена, очевидно, должна быть в слое 100—200 м.

Исследование порывистости ветра с помощью акселерографа

Инструментальные исследования структуры воздушного потока можно проводить на самолете путем регистрации нормальных ускорений силы тяжести. Под действием в основном вертикальных пульсаций воздушного потока самолет испытывает ускорения. По величине вертикального ускорения, регистрируемого акселерографом, и горизонтальной скорости самолета можно определить величину вертикального порыва ветра. В этой области имеется ряд работ, из которых в первую очередь следует отметить работы Н. З. Пинуса [2] и А. С. Дубова [3]. В этих работах подробно разобран вопрос и о методике обработки записей акселерографа.

В работе [3] дана связь между показаниями акселерографа и величиной вертикальных порывов ветра с учетом вертикальных пульсаций самолета. Формула эта в несколько упрощенном виде, для расчета w_z при регистрации перегрузок только в вертикальной плоскости, принимает вид

$$w_z = v_z + 3,64 \Delta n, \quad (1)$$

где w_z и v_z — вертикальные составляющие скорости ветра и самолета в м/сек., Δn — показания акселерографа в долях g (ускорение силы тяжести). Величина v_z определяется с помощью графического интегрирования.

При полетах в Каменной Степи применялся однокомпонентный акселерограф ЗП-11 с чувствительностью $\pm 1 g$. Лента имела ширину 100 мм. Отсчеты ускорений можно было практически делать до 0,01 g . Скорость оборота барабана с лентой равнялась 8 мм/сек., длина ленты, перематываемой с барабана на барабан, составляла 10 м. Акселерограф был установлен в центре тяжести самолета и записывал возмущения, период которых был не менее 0,1 сек. При средней скорости самолета 30 м/сек. это условие ограничивало минимальные горизонтальные размеры измеряемых вихрей до 3 м. Возмущения от вихрей больших размеров фиксировались прибором без существенных искажений. Минимальный горизонтальный размер измеряемых вихрей определялся из простой зависимости

$$L_{\min} = \tau_{\min} V,$$

где L_{\min} — минимальный размер вихря, τ_{\min} — минимально регистрируемый период возмущений, V — воздушная скорость самолета.

Средняя ошибка при пользовании формулой (1) составляет для нашего акселерографа около $\pm 0,2$ м/сек. и вызывается в основном неточностью определения величины ускорений при полете в воздушном потоке.

Методика полета с акселерографом, разработанная начальником Каменностепной экспедиции ГГО О. А. Дроздовым, была следующей. Самолет совершал неуправляемые полеты по горизонтальным площадкам на высотах 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1,0; 2,0 км по ветру и против ветра. Полет начинался по ветру (или против ветра) в степи, затем самолет пересекал массив лесных полос, в степи разворачивался, набирая следующую высоту, и снова шел по тому же маршруту, но уже против ветра.

Акселерограф включался на расстоянии 8 и 4 км до лесных полос, при пересечении массива лесных полос в центре их и в конце массива, а также 1—2 раза позади полос в степи, на расстоянии 4 и 8 км от полос.

Время записи на одной площадке составляло в среднем около 30 сек. Этот промежуток регистрации по ряду причин оказался малым, и в дальнейших исследованиях его необходимо увеличить до 50—60 сек. При регистрации в 30 сек. на одной площадке получалось до 7 записей. Одной ленты хватало обычно на один полет.

В дневные часы полеты на высотах 100 и 200 м из-за сильной болтанки часто не совершались.

При работе акселерографа летчик без крайней необходимости не вмешивался в управление полетом самолета. Акселерограф включался в том случае, если наблюдалась болтанка самолета, поэтому измерения по прибору будут характеризовать условия при наличии порывов ветра.

Всего было получено 10 лент с регистрацией изменения ускорений силы тяжести. По ряду причин 2 ленты были забракованы и обработано 8 лент для 10 полетов. Колебания ускорения силы тяжести происходили около начального положения в сторону как положительных ускорений (вверх), так и отрицательных (вниз). Число переломных точек сразу давало число порывов за данный отрезок времени. Проведя линию нормального значения ускорения силы тяжести, можно было найти число переходов данной величины через нуль.

При обработке лент акселерографа значения Δl определялись как отклонения g от нормального его значения.

Откладывая на графике величину $3,64 \Delta l$ и произведя графическое интегрирование, получали величину v_z из формулы (1), а затем уже вычисляли величину вертикальных порывов ветра в м/сек. Пример первичной обработки ленты акселерографа дан в табл. 2.

Таблица 2

Обработка ленты акселерографа

Полет 8/VII 1951 г. в 18 час. 15 мин., по ветру. $H = 149$ м.
Начало полос. Скорость самолета 110 км/час.

№ точек	Время, сек.	Δl в долях g	$\Delta l \cdot 3,64$	v_z м/сек.	w_z м/сек.
1	0,5	-0,20	-0,73	-0,34	-1,07
2	1,6	0,02	0,07	0,58	0,65
3	2,3	-0,10	-0,36	-0,14	-0,50
4	4,0	-0,10	-0,36	-0,02	-0,38
5	6,2	-0,21	-0,77	-0,25	-1,02
6	6,9	-0,09	-0,33	-0,05	-0,38
7	7,4	0,10	0,36	0,25	0,61
8	8,4	-0,33	-0,21	-0,50	0,71
9	9,6	0,04	0,14	0,19	0,33
10	10,6	-0,28	-1,03	-0,26	-1,29
11	11,6	0,04	0,14	0,58	0,72
12	12,4	-0,28	-1,02	-0,42	1,44
13	12,8	-0,15	-0,54	-0,16	-0,70
14	13,0	-0,27	-0,98	-0,25	-1,13
15	13,4	0,13	0,47	0,10	0,57
	и т. д.				

Полученные для каждой характерной точки значения вертикальных пульсаций w_z в м/сек. для соответствующих моментов времени наносились на график по оси ординат, а время в секундах — по оси абсцисс.

Дальнейшая обработка делалась двумя методами. По первому методу производился подсчет максимальных и минимальных величин вертикальных скоростей w_{\max} и w_{\min} , находилась величина максимальной амплитуды A_{\max} , вычислялась средняя арифметическая величина вертикальной скорости \bar{w} . Далее подсчитывалось число случаев перехода через нуль M , число порывов N , число секунд по продолжительности записи n и, наконец, вычислялись величины числа переходов через нуль в 1 сек. M/n и число порывов в 1 сек. N/n .

Результаты вторичной обработки по этому методу для двух горизонтальных уровней и для 7 площадок приведены в табл. 3. Все средние величины, полученные аналогично величинам, приведенным в табл. 3, были сведены в общую таблицу, с разделением на полеты утром, днем и вечером. Из-за малого числа случаев были в дальнейшем объединены все полеты над степью по ветру и против ветра, а также все полеты над лесными полосами. Ввиду небольших различий между условиями полета днем и вечером, эти полеты также соединены в одну группу.

Результаты подсчета величин ω , N/n и L , с разбивкой их по высотам для утра и дня в степи и над лесными полосами, приведены на рис. 1, 2 и 3.

Представленные на рисунках изменения с высотой числа порывов в 1 сек., горизонтальных размеров вихрей и величин вертикальных пульсаций над степью и лесными полосами дают из-за малого числа случаев пока общие ориентировочные характеристики влияния лесных полос на трансформацию воздушного потока в утренние и дневные часы.

Над степью утром и днем наблюдался нормальный ход порывистости ветра с высотой, т. е. число порывов с высотой растет утром до 200 м, а днем — до 300 м, далее резко уменьшается к высоте 0,5 км, а затем утром медленно убывает до 1 км, а в дневные часы несколько возрастает.

Над лесными полосами утром и днем порывистость наибольшая на высоте 100 м (ниже не имеется измерений) и быстро уменьшается с высотой. Утром уже на уровне 200 м число порывов в степи и над лесными полосами примерно одинаково. Таким образом, летом в утренние часы влияние лесной полосы на увеличение порывистости будет сказываться до высоты 200—250 м. Днем над лесными полосами порывистость ветра больше, чем утром, но также имеет максимум в самом

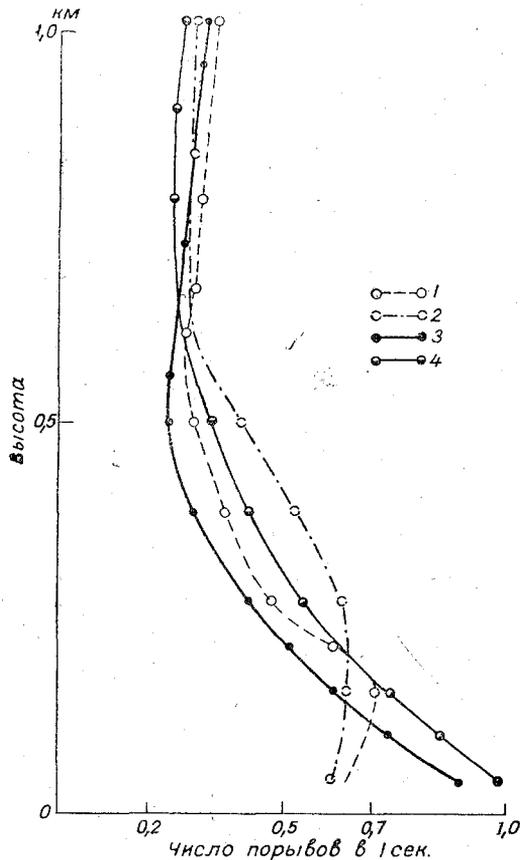


Рис. 1. Распределение числа порывов в 1 сек. степь: 1 — утро, 2 — день; лесные полосы: 3 — утро, 4 — день.

нижнем слое и резко уменьшается с высотой, на уровне 250 м становится одинаковой с порывистостью в степи и дальше с 300 м обе кривые идут почти параллельно.

Ход этих кривых очень близок к данным, полученным по визуальным наблюдениям бортаэролога за болтанкой самолета. Полученные по акселерографу результаты также хорошо совпадают с распределением порывистости по данным аэростатных подъемов в степи и над лесными полосами, взятым из работы автора [1] и приведенными в табл. 4.

Следует отметить, что применявшийся тогда аэростатный метеорограф начинал устойчиво регистрировать порывистость с 4 м/сек., поэтому отсутствие порывистости утром над лесными полосами на высоте 40 и 180 м отчасти объясняется этим обстоятельством. Для нижнего слоя в дневные часы порывистость ветра, полученная по всем методам, в общем хорошо совпадает между собой. Наибольшие величины порывов над лесными полосами получаются почти сразу же над кронами деревьев.

Таблица 3

Пример вторичной обработки акселерографа
Полет 3/VII 1951 г. в 11 час., по ветру

Измеряемые элементы	Высота полета, м						
	100				300		
	5 км от полос	Пересеченные полос	Центр полос	Конец полос	Пересеченные полос	Центр полос	Конец полос
w_{\max}	0,60	1,30	0,95	1,20	1,45	0,80	1,25
v_{\min}	0,70	1,60	1,60	1,60	1,55	1,85	1,60
A_{\max}	1,15	2,25	2,10	2,05	3,00	2,45	2,85
w	0,28	0,60	0,53	0,53	0,42	0,41	0,57
N	11	8	17	21	13	12	21
M	9	12	16	18	13	10	14
n	17,9	20,0	24,2	20,3	26,0	22,7	29,2
M/n	0,50	0,60	0,66	0,89	0,50	0,44	0,48
N/n	0,61	0,40	0,70	1,03	0,50	0,53	0,72

Таблица 4

Средние значения скорости и порывистости ветра (в м/сек.)
в Каменной Степи

Высота, м	Лесные полосы			Степь		
	Утро	День	Вечер	Утро	День	Вечер
2	1	3	2	2	6	4
40	$3 \pm 0,0$	$5 \pm 2,3$	$4 \pm 0,0$	$4 \pm 0,2$	$7 \pm 1,8$	$7 \pm 0,7$
180	$3 \pm 0,0$	$7 \pm 1,4$	$5 \pm 0,2$	$6 \pm 0,5$	$8 \pm 2,1$	$8 \pm 1,3$

На рис. 2 приведен ход средних значений величин вертикальных пульсаций w над степью и над лесными полосами по табл. 3. Эта вторая основная характеристика турбулентного состояния воздушного потока над степью и лесными полосами. Над степью как утром, так и днем величина w растет до высоты 300 м и примерно на 10—15% больше по сравнению с такой же величиной на высоте 100 м, а затем медленно убывает.

В дневные часы величины вертикальных пульсаций на уровне 100 м возрастают на 40—50% по сравнению с утренними как над степью, так и над лесными полосами. Над полосами наибольшие величины вертикальных пульсаций наблюдаются в самом нижнем слое и быстро уменьшаются с высотой, достигая минимума утром на высоте 200 м, а днем — на высоте 300 м, выше с небольшими колебаниями идут почти параллельно величинам вертикальных пульсаций над степью. Относительно большие разницы w в дневные и утренние сроки на высоте 1 км вызваны образованием кучевой облачности.

На рис. 3 дано распределение с высотой размеров вихрей, полученных путем умножения среднего периода пульсации самолета под влиянием вихрей на скорость самолета, принятую в 30 м/сек.

Для всех случаев можно отметить рост с высотой размеров вихрей, что вполне соответствует теоретическим положениям. Утром как над степью, так и над лесными полосами отмечается относительно быстрый рост размеров вихрей до высоты 300 м, причем над полосами размеры вихрей меньше примерно на 10%, чем над степью. Днем как над степью, так и над лесными полосами наблюдается некоторое умень-

шение с высотой размеров вихрей над лесными полосами до 200 м, а над степью — до 300 м. С высоты 200 м над лесными полосами отмечен быстрый рост размеров вихрей с максимумом в 170 м на высоте 500 м, над степью размеры вихрей получаются несколько меньшие. Если взять средние величины вихря в метрах вместе

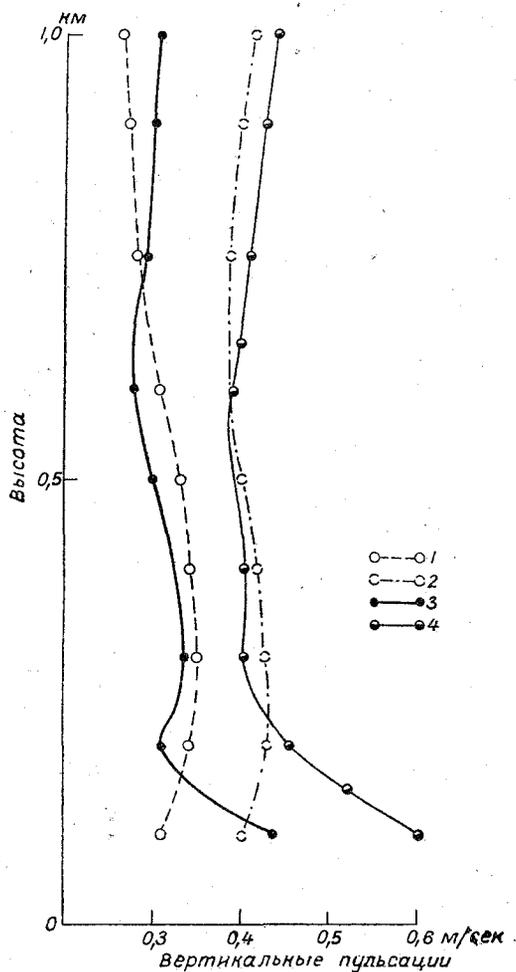


Рис. 2. Распределение вертикальных пульсаций с высотой.
степь: 1 — утро, 2 — день; лесные полосы: 3 — утро, 4 — день.

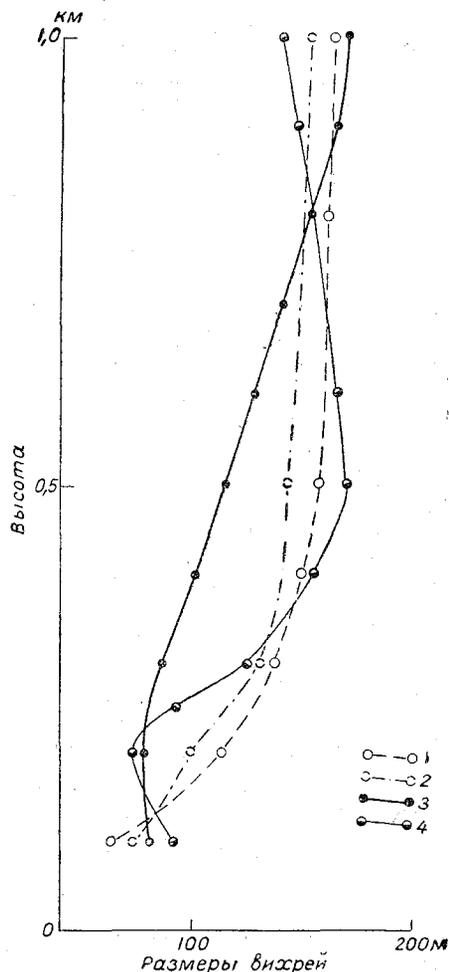


Рис. 3. Распределение средних размеров вихрей.
степь: 1 — утро, 2 — день; лесные полосы: 3 — утро, 4 — день.

для степи и полос только с делением их на утро и день, то получаются следующие величины:

Высота, км	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
Утро . . .	92	110	125	140	156
День . . .	88	72	100	142	156

С высоты 500 м размеры вихрей как днем, так и утром одинаковы.

В общем, по приведенным выше данным, можно ориентировочно считать, что воздушный поток, переходя со степи на массив лесных полос, резко меняет свою структуру. В самом нижнем слое в потоке увеличивается частота порывов в единицу времени утром примерно на 40%, а днем — на 60%, возрастает величина вертикальных пульсаций на 40—45% и несколько уменьшаются горизонтальные размеры вихрей. Такие различия в строении потока утром наблюдаются до высоты

200 м, днем — до 300 м. Следовательно, над лесными полосами размеры вихрей несколько уменьшаются, амплитуды колебаний вертикальной составляющей скорости растут и увеличиваются неупорядоченные пульсации потока. С уровня 300 м особых различий между структурой потока над степью и лесными полосами не обнаруживается.

По субъективным оценкам бортаэролога степени болтанки самолета в дневные часы, наиболее сильная болтанка отмечена на высоте 500 м. Вызвано это, очевидно, наибольшим развитием на этой высоте динамической турбулентности. По измерениям акселерографа, на уровне 500 м отмечен только быстрый рост горизонтальных размеров вихрей как над степью, так и лесными полосами. Возможно, что наличие вихрей относительно больших размеров, большими периодами пульсации, при уменьшении термической турбулентности на высоте 500 м вызовут и резкие провалы самолетов. Для наблюдателя эти отдельные резкие провалы самолета будут казаться очень сильной болтанкой, а акселерограф хотя и отметит немногочисленные случаи большой перегрузки, но они отчасти будут сглажены при принятом методе вычислений средних величин.

До настоящего времени еще нет качественных сравнений оценки степени болтанки самолета бортнаблюдателем и по измерениям акселерографа, хотя различия в оценках должны быть.

В ранее изложенной схеме обработки вычислялись величины вертикальных пульсаций как среднеарифметические из приведенных в табл. 3 значений. Другой интересной характеристикой структуры воздушного потока является величина скорости нарастания и спада порывов u_z , которую можно подсчитать как разность скорости w_z между двумя переломными по ходу отсчетами. Например, в табл. 2 величина скорости нарастания порыва между точками 1 и 2 составляет 1,72 м/сек., а скорости спада между точками 2 и 3 — 1,15 м/сек. Соответственно можно подсчитать полупериоды времени роста и спада пульсаций. Для выяснения величин перегрузок, испытываемых самолетом, можно подсчитать аналогичным способом скорости нарастания и спада перегрузок при порывах в долях g , отнесенных к 1 сек. и обозначаемых далее через λ .

Таким способом были обработаны те же материалы измерений по акселерографу, с разделением их на скорости нарастания и спада порывов u_z и перегрузок самолета λ . Результаты обработки приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Средние величины скорости нарастания и спада порывов и перегрузок самолета

Высота, м	Время суток	Лесные полосы					Степь				
		Рост		Спад		Число случаев	Рост		Спад		Число случаев
		u_z	λ	u_z	λ		u_z	λ	u_z	λ	
100	Утро . . .	0,27	0,06	0,39	0,08	3	0,39	0,06	0,36	0,07	3
	День . . .	1,03	0,22	1,10	0,36	10	0,67	0,19	0,63	0,22	3
	Вечер . . .	1,05	0,30	1,07	—	5	0,80	0,16	0,79	0,26	3
300	Утро . . .	0,36	0,02	0,29	0,03	2	0,35	0,02	0,25	0,02	2
	День . . .	0,79	0,18	0,77	0,22	11	0,96	0,18	0,76	0,25	6
	Вечер . . .	0,60	0,16	0,55	0,12	5	0,59	0,15	0,62	0,13	7
500	Утро . . .	0,40	0,05	0,40	0,02	2	0,27	0,03	0,21	0,07	3
	День . . .	0,55	0,18	0,58	0,11	3	0,70	0,12	0,76	0,10	7
	Вечер . . .	0,51	0,09	0,60	0,08	4	0,55	0,08	0,50	0,10	8
1000	Утро . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	День . . .	0,74	0,16	0,77	0,16	2	0,70	0,15	0,65	0,16	3
	Вечер . . .	0,93	0,06	0,92	0,09	2	0,62	0,08	0,61	0,07	6

Как в ходе величин вертикальных пульсаций, так и в скоростях нарастания и спада их можно выделить влияние лесных полос на трансформацию воздушных потоков.

Измерения по акселерографу в утренние часы ввиду малого числа случаев дают несколько случайные величины и не могут служить надежной характеристикой воздушного потока. Можно отметить, что утром различия между величинами вертикальных пульсаций и скоростями нарастания и спада очень небольшие. Днем на высоте 100 м скорости нарастания порывов над лесными полосами составляют 1,06 м/сек., а над степью — 0,65 м/сек. Ход величины u_z с высотой в общем аналогичен ходу w_z . Возрастание u_z на 1,0 км, очевидно, вызвано наличием кучевой облачности, под которой часто совершались полеты. Приведенные измерения за вечерние часы позволяют получить суточный ход величин u_z и λ . В табл. 5 хорошо заметен суточный ход этих величин, с максимумом в дневные часы и минимумом утром и ростом ко дню u_z на высоте 100 м в 2—4 раза, на высоте 300 м — в 0,8—2,5 раза, на высоте 500 м — от 0,4 до 2,5 раза. Таким образом, наибольший рост за сутки скоростей нарастания порывов наблюдается над лесными полосами на высоте 100 м, а над степью — на уровне 300 м.

Некоторой косвенной характеристикой структуры потока является скорость нарастания перегрузок самолета λ под влиянием возмущенного воздушного потока.

Над лесными полосами наибольшая величина λ получается на высоте 100 м и далее уменьшается. Над степью наибольшие величины λ получаются на высоте 300 м. При переходе со степи на лесные полосы величина λ растет почти на 30—40% на высотах 100 и 500 м и несколько меньше на высоте 300 м; значения λ приблизительно одинаковы на высоте 1 км. В утренние часы величины λ наименьшие и возрастают днем в 3—4 раза, а иногда и в 6—7 раз.

Таким образом, ход значений u_z и λ над лесными полосами и степью также подтверждает трансформацию воздушного потока лесными полосами. В утренние часы это сказывается несколько слабее, а днем — более резко. Над полосами происходит увеличение скорости нарастания и спада вертикальных порывов и скоростей нарастания перегрузок самолета, что заметно днем в слое до 300 м. На высоте 1 км при полетах под облаками наблюдается усиление вертикальных порывов и перегрузок самолета.

Далее приведем (табл. 6) повторяемость по градациям скоростей нарастания вертикальных пульсаций и перегрузок самолета при полетах над степью и лесными полосами. Повторяемости вычислены для всех переломных точек в ходе вертикальных пульсаций, поэтому число случаев значительно больше, чем в табл. 6.

Величина $u_z > 1$ м/сек. чаще всего наблюдается над лесными полосами на высоте 100 м: утром — около 10% всех случаев, днем — почти в 40%, а вечером даже доходит до 45—48%. Следует отметить, что увеличение u_z в вечерние часы, очевидно, вызвано методикой подсчета, по которой осредненные наблюдения с 8 до 18 час. отнесены к дневному периоду и мало чем отличались от измерений в период с 18 до 19 час. 30 мин., которые отнесены уже к вечернему сроку. Разделить же день на меньшие промежутки времени из-за небольшого числа полетов было невозможно.

Если над лесными полосами $u_z > 1$ м/сек. чаще всего наблюдается на высоте 100 м, то над степью $u_z > 1$ м/сек. имеет максимум на 300 м с повторяемостью в дневные часы до 25—35%. На уровне 500 м повторяемость $u_z > 1$ м/сек. составляет до 25% всех случаев и почти одинакова как над степью, так и над лесными полосами.

Наличие на высоте 1,0 км больших значений u_z вызвано общей неустойчивостью атмосферы и развитием кучевой и мощнокучевой облачности, при которой вертикальные пульсации возрастают.

В табл. 6, как и в предыдущих таблицах, хорошо заметно влияние лесной полосы на трансформацию воздушного потока, распространяющееся до высоты 200—300 м. В общем величины вертикальных порывов летом над Каменной Степью значительно меньше приводимых Н. З. Пинусом [2] для равнинных и горных трасс линий воздушных сообщений. В Каменной Степи вертикальных порывов

Повторяемость (в %) скорости нарастания и спада (в м/сек.)
вертикальных пульсаций

Высота, м	Время суток	Лесные полосы								Степь									
		Рост				Спад				Число случаев	Рост				Спад				Число случаев
		0,0—0,5	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—3,0	0,0—0,5	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—3,0		0,0—0,5	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—3,0	0,0—0,5	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—3,0	
100	Утро . . .	68	18	14	—	62	27	9	2	32	67	22	10	—	60	37	3	—	31
	День . . .	28	32	29	10	30	31	29	10	35	57	34	4	14	48	48	4	—	28
	Вечер . . .	30	26	24	20	24	28	29	19	49	10	68	22	—	43	25	32	—	21
300	Утро . . .	65	25	10	—	61	37	2	—	24	61	25	9	4	77	7	13	3	30
	День . . .	47	26	19	8	44	31	17	8	22	39	37	22	3	37	28	33	2	56
	Вечер . . .	51	42	7	—	58	31	11	—	48	55	32	13	—	50	32	18	—	56
500	Утро . . .	41	54	5	—	45	45	10	—	20	55	30	15	—	53	35	7	4	68
	День . . .	55	24	21	—	44	41	11	4	24	40	35	25	—	37	38	23	2	77
	Вечер . . .	68	20	12	—	44	48	8	—	25	57	28	15	—	52	41	7	—	61
1000	Утро . . .	49	39	12	—	64	29	7	—	8	60	30	10	—	50	34	16	—	30
	День . . .	42	31	23	4	34	42	13	11	24	53	34	8	5	39	51	10	—	34
	Вечер . . .	30	20	40	10	20	30	30	10	10	55	21	19	5	55	27	18	—	45

больше 5 м/сек. отмечено не было. Почти 60—65% всех порывов лежит в пределах ± 1 м/сек.

Рассмотренные материалы позволяют сделать следующие краткие ориентировочные выводы, применимые для легкого периода в районе Каменной Степи.

1. Массив лесных полос оказывает влияние на воздушный поток в среднем в утренние часы до высоты 200 м, днем — до 300 м. Наибольшее изменение турбулентного состояния отмечено на высоте 100 м.

2. Над массивом лесных полос на высоте 100 м наблюдается возрастание числа порывов утром на 40—50%, днем до 65% по сравнению со степью. Величины вертикальных пульсаций соответственно растут на 30—50%, горизонтальные размеры вихрей уменьшаются днем на 20%.

3. Над степью до высоты 300 м наблюдается рост с высотой числа порывов и величины вертикальных пульсаций, над лесными полосами отмечено резкое уменьшение этих величин с высотой до уровня 300 м.

4. С высоты 300—500 м резких различий в строении воздушного потока над степью и лесными полосами не обнаружено.

5. Горизонтальные размеры вихрей растут с высотой как над степью, так и над лесными полосами, особенно быстро до высоты 300—500 м, и имеют величины в среднем в пределах от 90 м на высоте 0,1 км и до 160 м на уровне 1 км.

6. Для случаев с болтанкой самолета, когда включался акселерограф, различие в средних величинах вертикальных пульсаций утра и дня составляет 30—40% на уровне 100 м и уменьшается с высотой; средние абсолютные значения вертикальных пульсаций находятся в пределах 30—60 см/сек.

7. На уровне 500 м наблюдаются вихри значительных горизонтальных размеров, которые в сочетании с большими скоростями нарастания и спада вертикальных пульсаций могут, очевидно, создавать отдельные глубокие броски самолета.

8. Периоды перегрузок самолета растут с высотой от 3 сек. на 100 м до 5,2 сек. на 1 км утром и соответственно от 2,4 сек. до 5,3 сек. днем.

9. Наблюдаемые на высоте 1 км значительные величины вертикальных пульсаций в дневное время подтверждаются наличием кучевой и мощнокучевой облачности, под которой совершался полет.

10. Ход скорости нарастания и спада вертикальных пульсаций в общем подобен ходу средних значений вертикальных порывов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов П. А. Аэрологические условия суховейных периодов летом 1951 г. в Каменной Степи. Труды ГГО, вып. 36, 1952.
 2. Пинус Н. З. К вопросу об экспериментальном исследовании воздушных потоков. Метеорология и гидрология, № 4, 1946.
 3. Дубов А. С. Определение скорости вертикальных порывов ветра при самолетных зондированиях с помощью акселерографа. Труды ГГО, вып. 16, 1949.
-

ОПЫТ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПУНКТАХ ПО ШАРОПИЛОТНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

В 1950 г. была проведена работа по выбору метода вычисления коэффициента турбулентности по шаропилотным наблюдениям [1]. Из всех рассмотренных тогда формул для практического применения была выбрана одна из формул Д. Л. Лайхтмана [6]

$$k = \frac{2l (\lg e)^2}{\left(\frac{d(u - u_g)^2 + v^2}{dz} \right)^2}, \quad (1)$$

где k — коэффициент турбулентности во всем слое перемешивания в м²/сек., l — параметр Кориолиса, e — основание натуральных логарифмов, u и v — составляющие скорости ветра, u_g — составляющая скорости геострофического ветра по оси X .

Формула (1) выведена Д. Л. Лайхтманом в предположении стационарности движения, малой кривизны траектории движения частиц и однородности воздушных масс, т. е. случаев, когда горизонтальные градиенты температуры малы. При этих условиях практически наблюдается правый поворот ветра и увеличение скорости ветра с высотой.

По формуле (1) были вычислены [1] средние k для района Ленинграда (Колтуши и Воейково); тогда же получены некоторые зависимости \bar{k} от других метеорологических элементов.

Настоящая работа является продолжением работы 1950 г. Вычисления k проводились также по упомянутой формуле (1). При этом прежде всего дополнительно была проведена работа по уточнению методики вычисления среднего \bar{k} , затем вычислены значения \bar{k} по ряду пунктов, чтобы выяснить зависимость \bar{k} от географических условий — широты и рельефа местности.

Материалом для вычисления \bar{k} послужили шаропилотные наблюдения в летнее время (с правым поворотом ветра и ростом скорости ветра с высотой) для ряда станций, расположенных в разных географических условиях. Более детальные вычисления \bar{k} выполнены по наблюдениям, проведенным летом 1951 г., с 21/VI по 21/VII, экспедицией ГГО в Долгопрудной и по основным наблюдениям ЦАО за этот же период. Кроме этого, за лето 1951 г. использовались шаропилотные наблюдения в Каменной Степи второй экспедиции ГГО.

Из всех шаропилотных наблюдений, проведенных в Долгопрудной с 21/VI по 21/VII 1951, были выбраны 22 случая. По этим данным, после значительного сглаживания, были вычислены коэффициенты турбулентности по формуле (1). В основном принимались во внимание наблюдения до 3 км. Так как k меняется в течение дня, то все вычисленные значения k объединены в зависимости от сроков наблюдений.

Для характеристики материала в табл. 1 приведено распределение числа наблюдений по срокам.

Таблица 1

Среднее время, час. — мин.	4—30	8—30	11—30	15—00
Число наблюдений	5	7	5	5

Дальше будут приведены средние значения k , вычисленные из отдельных наблюдений, сгруппированных по указанным срокам.

Для сравнения величин k , вычисленных по шаропилотным наблюдениям, с величинами k_1 , полученными по градиентным данным, были поставлены градиентные измерения летом 1951 г. на ст. Долгопрудной. Температура измерялась с помощью аспирационного психрометра на высотах 0,5 и 2 м, скорость ветра — ручным анемометром на высоте 1 м.

Для выяснения влияния микроусловий на величину коэффициента турбулентности градиентные измерения проводились параллельно на метеоплощадке ЦАО (относительно закрытая площадка) и на аэродроме (открытое поле). На метеоплощадке наблюдения велись под руководством научного сотрудника ЦАО М. С. Гольдфарба, на аэродроме — научным сотрудником ГГО И. И. Честной. Отсчеты по приборам производились 2—3 раза в течение 10—15 мин., а затем осреднялись.

По полученным значениям температуры на высотах 0,5 ($t_{0,5 м}^{\circ}$) и 2 м ($t_{2 м}^{\circ}$) и по значениям скорости u_1 на 1 м были подсчитаны коэффициенты турбулентности на высоте 1 м по формуле М. П. Тимофеева [2]

$$k_1 = \frac{0,16}{\ln \frac{1}{z_{00}}} u_1 \left(1 + 7,5 \frac{\Delta t}{u_1^2} \right), \quad (2)$$

где k_1 — коэффициент турбулентности на высоте 1 м, z_{00} — шероховатость поверхности, принятая для скошенной травы равной 0,2 см, Δt — разность температур на высотах 0,5 и 2 м, u_1 — скорость ветра на высоте 1 м.

Эта формула не всегда может быть применена (например, при инверсиях и малых скоростях ветра), так как дает отрицательное значение k . Такие случаи пришлось исключить из рассмотрения.

Для характеристики наземных наблюдений в табл. 2 приведено распределение числа случаев по срокам.

Таблица 2

Распределение числа градиентных наблюдений по срокам

Метеоплощадка

Среднее время, час. — мин.	4—30	6—50	8—20	11—20	14—00	16—20
Число наблюдений	3	11	14	14	16	16

Аэродром

Среднее время, час. — мин.	7—10	7—50	8—50	10—25	11—20	13—10
Число наблюдений	3	9	8	9	8	4

На рис. 1 приводим изменения \bar{k}_1 в течение дня, полученные по наземным наблюдениям на метеоплощадке (нанесены сплошной линией) и на аэродроме (пунктирная линия), и \bar{k} в свободной атмосфере, вычисленные по шаропилотным наблюдениям (пунктир с точками). Из рис. 1 видно, что величины \bar{k}_1 на аэродроме и на метеоплощадке отличаются незначительно и достигают максимума в первую половину дня, тогда как \bar{k} в свободной атмосфере, повидимому, имеет максимум во вторую половину дня. Исследования [1] также показали, что \bar{k} в свободной атмосфере достигает максимального значения в 13—14 час.

Для приземного слоя исследования М. П. Тимофеева [3] и В. С. Шевелевой [4] дают максимальное значение коэффициента турбулентности на высоте 1 м во вторую половину дня.

Из рис. 1 видно, что в утренние часы (до 8—9 час.) коэффициент турбулентности в свободной атмосфере растет медленно, а затем быстро. То же было замечено по наблюдениям в Воейково [1]. Это объясняется тем, что утром турбулентность распространяется на незначительную высоту. Это можно подтвердить и числами Ri , вычисленными по температурному зондированию и шаропилотным наблюдениям.

Числа Ri являются критерием затухания или развития турбулентности и, как известно, выражаются следующим образом:

$$Ri = \frac{g}{\bar{T}} \frac{(\gamma_a - \gamma)}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}, \quad (3)$$

где g — ускорение силы тяжести, \bar{T} — средняя абсолютная температура слоя, γ_a — сухоадиабатический градиент температуры, γ — фактический вертикальный температурный градиент, u и v — составляющие скорости ветра.

При вычислении в знаменателе вместо производных чаще всего берутся конечные разности. Турбулентность должна затухать при $Ri > 1$ и возрастать при $Ri < 1$. По средним значениям числителя и знаменателя формулы (3) были вычислены значения числа \bar{Ri} по слоям и срокам дня.

В табл. 3 приводим эти значения. В последней колонке указано число случаев n для каждого срока.

Из таблицы видно, что утром на всех высотах $\bar{Ri} > 1$, а около 8 час. в самом нижнем слое до 0,5 км $\bar{Ri} < 1$, выше 0,5 км турбулентность еще слабая. Наибольшая турбулентность, судя по числам \bar{Ri} и высоте турбулентного слоя, достигается во второй половине дня. Примерно то же было замечено по наблюдениям в Колтушах для летнего времени [5].

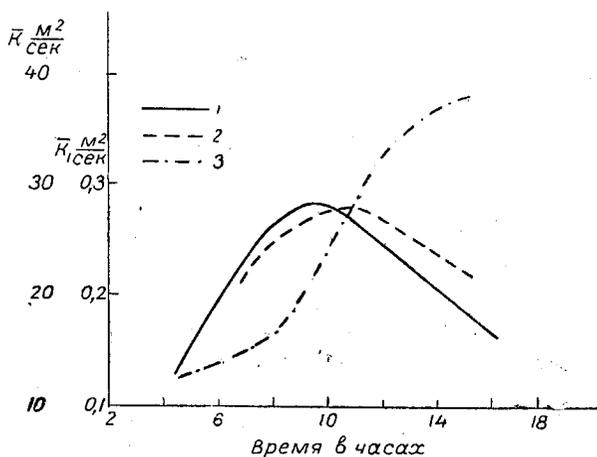


Рис. 1. Изменения \bar{Ri} и \bar{k}_1 в течение дня. ст. Долгопрудная.

1 — метеоплощадка, 2 — аэродром, 3 — свободная атмосфера.

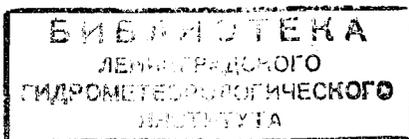
101967

Таблица 3

Средние значения числа Ri в период 21/VI—21/VII 1951 г. ст. Долгопрудная

Среднее время, час.—мин.	Δz км								n
	0,3—0,5	0,5—0,7	0,7—1,0	1,0—1,25	1,25—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,5—3,0	
4—43	1,4	2,4	3,4	2,7	3,9	2,8	8,5	8,4	19
7—42	—0,16	1,2	2,2	0,94	2,1	3,1	4,4	8,5	11
10—24	—1,01	—0,48	0,22	0,99	0,97	4,3	6,2	7,0	7
14—20	—2,0	0,82	0,92	—0,17	—0,01	7,3			3
16—33	0,58	0,38	1,2	1,7	2,1	2,0	8,5	10,0	19

Для выяснения влияния микроусловий были выбраны близкие по времени градиентные наблюдения на метеоплощадке и на аэродроме и сопоставлены значения скорости ветра на аэродроме u_a со скоростями ветра на метеоплощадке u_m (рис. 2). Из рисунка следует, что скорость ветра на аэродроме всегда больше, чем скорость



на метеоплощадке, что объясняется более закрытым местоположением метеоплощадки (деревья и разного рода строения).

Подобным же образом на рис. 3 нанесены значения разности температуры между высотами 0,5 и 2 м (Δt_a и Δt_m). Зависимость между разностями температур проявлена не столь отчетливо, но все же заметно, что в преобладающем числе случаев разности температуры на аэродроме больше, чем на метеоплощадке. Зависимость между k_a и k_m (рис. 4) выражена еще слабее.

Для вычисления \bar{k} в слое механического перемешивания, как уже сказано выше, были подобраны соответствующие шаропилотные наблюдения. Известно, что шаро-

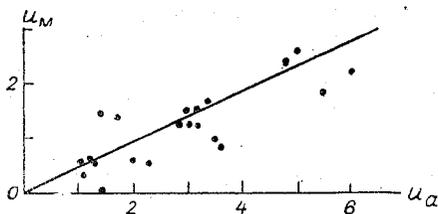


Рис. 2. Зависимость между u_m и u_a .

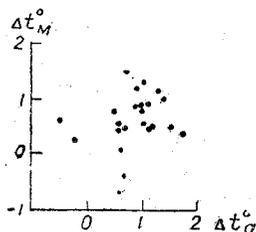


Рис. 3. Зависимость между Δt_m и Δt_a .

пилотные наблюдения имеют точность по направлению до $\pm 5^\circ$, а скорости — до ± 1 м/сек. Для вычисления k брались сглаженные значения скорости и направления ветра, а за величину и направление геострофического ветра принимались те значения, при которых происходили незначительные изменения ветра по высоте. В большинстве случаев сглаживание происходило в пределах точности наблюдения, только иногда отдельные точки отклонялись больше предела точности. По одному и тому же наблюдению при различном сглаживании можно получить различные значения k . Чтобы показать, насколько могут различаться эти значения k между собой, приведем несколько примеров.

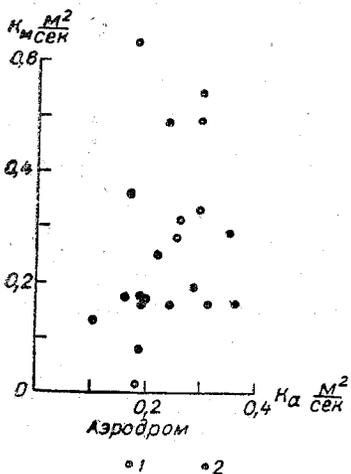


Рис. 4. Зависимость между k_m и k_a .
1 — утренние наблюдения, 2 — дневные наблюдения.

Пример 1. Шаропилотные наблюдения в Каменной Степи 28/VI в 5 час. Три лица, независимо один от другого, провели сглаженные кривые по нанесенным значениям скорости и направления ветра. По отклонениям направления ветра от геострофического и скорости ветра по высотам получили по формуле (1) три различных значения k : 11,3; 8,1 и 10,2 м²/сек. Среднее из всех найденных значений 9,9 м²/сек. Наибольшее отклонение от среднего 18%.

Лучшие результаты получаются, если до сглаживания провести осреднение однородных наблюдений. Чтобы показать это, рассмотрим пример 2.

Пример 2. Подобрано 5 шаропилотных наблюдений, удовлетворяющих поставленным выше условиям. Направления и скорости, полученные по этим наблюдениям, осреднили. Средние значения нанесли на график. Сглаживание также было проведено тремя лицами. Получили значения k : 6,8; 6,4; 7,9 м²/сек., среднее — 7,0 м²/сек. Наибольшее отклонение от среднего 13%.

Таким образом, из приведенных примеров видно, что наиболее надежные результаты можно получить при вычислении \bar{k} по средним направлениям и скоростям ветра, к тому же расчеты по средним проводятся значительно быстрее.

Так как раньше обычно мы получали \bar{k} при суммировании значений k , вычисленных по отдельным наблюдениям, то было решено сопоставить k , вычисленные разными способами. Это сделано для ст. Долгопрудная. На рис. 5 нанесены значения \bar{k} по срокам дня: сплошной линией — вычисленные по отдельным случаям, пунктирной линией — по средним направлениям и скоростям ветра.

Расхождение между кривыми незначительное. На этом же рис. 5 нанесены значения \bar{k} , вычисленные по средним направлениям и скоростям ветра по более значительному числу случаев для ближайшей станции — Кунцево (1939 г.). (пунктир с точками). Величины \bar{k} для Кунцево близки к вычисленным значениям \bar{k} для Долгопрудной.

Из шаропилотных наблюдений в Каменной Степи было выбрано 27 случаев, по которым после сглаживания вычислялись коэффициенты турбулентности. Вычисления проводились как по отдельным наблюдениям, так и по средним данным по ветру. Выбранные наблюдения группировались по срокам дня (табл. 4).

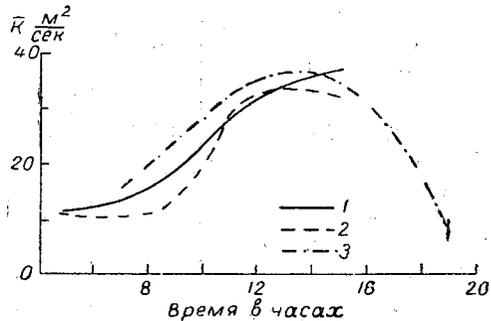


Рис. 5. Изменение \bar{k} в течение дня. ст. Долгопрудная: 1 — по отдельным случаям, 2 — по средним направлениям и скоростям ветра; ст. Кунцево: 3 — по средним направлениям и скоростям ветра.

Таблица 4

Распределение числа наблюдений по срокам дня.
ст. Каменная Степь

Среднее время, часы	5	9	13	17	19—30
Число наблюдений	6	5	7	4	5

На рис. 6 приводим изменение \bar{k} в течение дня, вычисленное (двумя способами) по шаропилотным наблюдениям в Каменной Степи. Обе кривые — сплошная и пунктирная — довольно близки между собой. На этом же рисунке нанесены значения \bar{k} , полученные по средним направлениям и скоростям ветра для Воронежа (1938—1939 гг.). Кривые пунктирная и пунктир с точками значительно отличаются между собой; это говорит о том, что \bar{k} для Воронежа значительно выше, чем для Каменной Степи. Сравнение рис. 5 и рис. 6 показывает, что \bar{k} для Воронежа близко к значениям \bar{k} в дневное время, полученным для Долгопрудной

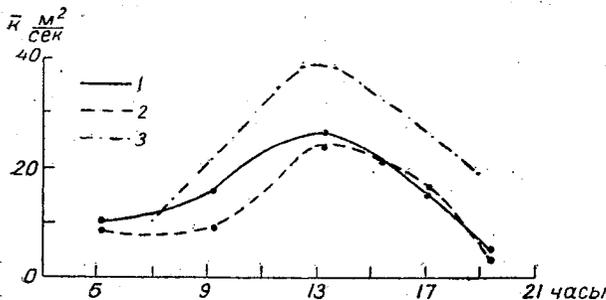


Рис. 6. Изменение \bar{k} в течение дня. ст. Каменная Степь: 1 — по отдельным случаям, 2 — по средним направлениям и скоростям ветра; 3 — ст. Воронеж, по средним направлениям и скоростям ветра.

и Кунцево. Повидимому, меньшее значение \bar{k} в дневное время для Каменной Степи можно объяснить влиянием подстилающей поверхности, которая в степи более ровная, чем на указанных выше станциях.

Для выявления влияния географических условий на величину \bar{k} были вычислены значения \bar{k} для 7 станций, расположенных на различных широтах. Эти значения приведены в табл. 5 для трех сроков наблюдений.

Таблица 5

Название станций и годы наблюдений	φ	λ	Время суток	\bar{k}	\bar{u}_g	Число наблю- дений
Свердловск 1938—1940	56°44'	60°04'	Утро	20,7	12,0	80
			День	39,4	10,2	62
			Вечер	15,0	10,7	94
Кунцево 1939	55 44	37 25	Утро	15,9	11,5	20
			День	37,1	9,5	21
			Вечер	6,6	8,8	15
Куйбышев 1938—1940	53 14	50 10	Утро	4,0	10,0	56
			День	21,3	9,0	59
			Вечер	18,5	9,5	56
Воронеж 1938, 1939	51 40	39 10	Утро	10,2	10,5	30
			День	38,4	10,0	16
			Вечер	19,8	10,5	37
Ершов 1938, 1939	51 20	48 17	Утро	16,5	11,6	34
			День	27,7	9,5	40
			Вечер	9,2	9,0	28
Борисполь 1938—1940	50 19	30 59	Утро	13,9	10,0	55
			День	20,9	9,0	59
			Вечер	15,0	10,0	69
Харьков 1938	49 55	36 16	Утро	3,6	8,5	22
			День	17,9	9,0	21
			Вечер	—	—	—

Наибольшее значение \bar{k} в дневное время, как видно из табл. 5, получено для Свердловска. Интересно, что для Свердловска, Кунцево и Воронежа величины \bar{k} довольно близки, хотя станции находятся на разных широтах. Повидимому, широта места имеет незначительное влияние на \bar{k} . Действительно, возьмем из табл. 5 две станции, расположенные на самой высокой и самой низкой широте. Таковыми в нашей таблице являются Свердловск ($\varphi = 56^\circ 44'$) и Харьков ($\varphi = 49^\circ 51'$). Для этих станций синусы, входящие в параметр l формулы (1), отличаются по величине меньше 10% . Величина \bar{k} , если бы она зависела только от широты места, должна быть в Харькове меньше примерно на 10% . На самом же деле значение \bar{k} для Харькова (в этом примере) почти в 2 раза меньше, чем в Свердловске.

Заслуживают внимания данные для близко расположенных станций: Каменной Степи и Воронежа. Значения \bar{k} на этих станциях отличаются между собой существенно. Здесь, повидимому, большое влияние оказывает рельеф местности. Очевидно, что мелкие неоднородности подстилающей поверхности в степи являются причиной образования небольших вихрей, тогда как холмистая поверхность (как, например, в Свердловске) способствуют образованию более крупных завихрений, которые распространяются в атмосфере на большую высоту.

Из приведенной табл. 5 видно, что \bar{k} растет на всех станциях от утра ко дню чаще всего в 2—4 раза и к вечеру убывает. \bar{u}_g в большинстве случаев убывает от утра ко дню.

Из всего вышеизложенного можно прийти к заключению:

1. Максимальное значение \bar{k} в слое механического перемешивания достигается в суточном ходе несколько позднее, чем в приземном слое, и значение \bar{k} в свободной атмосфере примерно в 100 раз больше, чем на высоте 1 м в приземном слое.

2. В целях ускорения и уточнения подсчетов \bar{k} можно пользоваться средними данными по ветру, сгруппированными по времени дня.

3. Величина \bar{k} в слое механического перемешивания зависит главным образом от рельефа местности. Наибольшее значение \bar{k} получено для холмистой местности и наименьшее — для степной.

Так как вычисленные средние значения \bar{k} относятся к определенному типу погоды (однородные воздушные массы), что бывает редко, то в дальнейшем необходимо разработать метод вычисления коэффициента турбулентности для более общих погодных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуринова М. П. Некоторые данные о коэффициенте турбулентности в свободной атмосфере. Труды ГГО, вып. 28, 1951.
2. Тимофеев М. П. О методике определения теплового баланса подстилающей поверхности. Труды ГГО, вып. 27, 1951.
3. Тимофеев М. П. О суточной изменчивости турбулентного обмена. Труды ГГО, вып. 22, 1950.
4. Шевелева В. С. К вопросу о суточном ходе коэффициента турбулентности. Изв. АН СССР, серия географ. и геофиз., т. VIII, № 1, 1944.
5. Чуринова М. П. О турбулентности в некоторые дни с кучевыми облаками. Труды ГГО, вып. 24, 1950.
6. Лайхтман Д. Л. Новый метод определения коэффициента турбулентной вязкости в пограничном слое атмосферы. Труды ГГО, вып. 37, 1952.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ВЕТРА В НИЖНЕМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В работе даны результаты исследований микроструктуры воздушного потока, проводившиеся в 1952 г. в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, при помощи специально разработанных приборов, поднимаемых на привязном аэростате.

Для этих исследований применялся прибор с регистрацией горизонтальной составляющей порывистости ветра и средней скорости ветра.

Высота подъема определялась с помощью весьма чувствительного приемника давления, состоящего из 5 anerоидных коробок, соединенных в столбик. Регистрация горизонтальной составляющей порывов ветра проводилась по методу П. А. Молчанова [1]. Приемник горизонтальной составляющей порывов ветра в наших приборах, так же как и в приборах П. А. Молчанова, был в виде пропеллера с горизонтальной осью.

Приборы обычно поднимались до высоты 300 м, со ступеньками продолжительностью на высотах 3 м в 1 мин., на 100, 200 и 300 м — в 3—4 мин. Часовой механизм имел ограничитель и после полного оборота автоматически останавливался.

Обработка горизонтальной составляющей порывистости ветра

Одной из основных характеристик турбулентности атмосферы является величина пульсаций средней скорости ветра. Исходя из средней величины полуамплитуды колебаний скорости ветра за время пребывания прибора на данном уровне (3—4 мин.), установлено 6 баллов¹ для оценки порывистости ветра (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика различных баллов горизонтальной составляющей порывистости ветра

Средние величины полуамплитуды колебаний	Балл порывистости					
	I	II	III	IV	V	VI
Нижний предел, м/сек.	0,0	0,1	0,40	0,9	1,5	3,0
Верхний предел, м/сек.	0,1	0,4	0,9	1,5	3,0	—
Степень порывистости	Отсутствует	Слабая	Умеренная	Сильная	Очень сильная	Шквальная

Балл I соответствует слабо турбулентному потоку. Выделить чисто ламинарный поток прибором было невозможно, так как приемник реагировал на

¹ Предложенная автором шкала оценки порывистости ветра для характеристики турбулентности атмосферы имеет условный характер, так как учитывает только величину пульсаций скорости и не учитывает периода пульсаций. (Ред.)

изменение скорости ветра с точностью до 0,1 м/сек. В проведенных измерениях не было отмечено случаев с баллом VI; отчасти это обстоятельство вызвано тем, что такая порывистость могла наблюдаться только при больших скоростях ветра, когда подъемы привязного аэростата уже не производились, а отчасти тем, что чувствительность приборов не была рассчитана на такие большие скорости ветра и большую интенсивность порывов. Пример записи порывистости дан на рис. 1 и 2. На рис. 1 дана запись горизонтальных и вертикальных составляющих порывов ветра при наличии инверсии температуры воздуха. Верхняя пилообразная

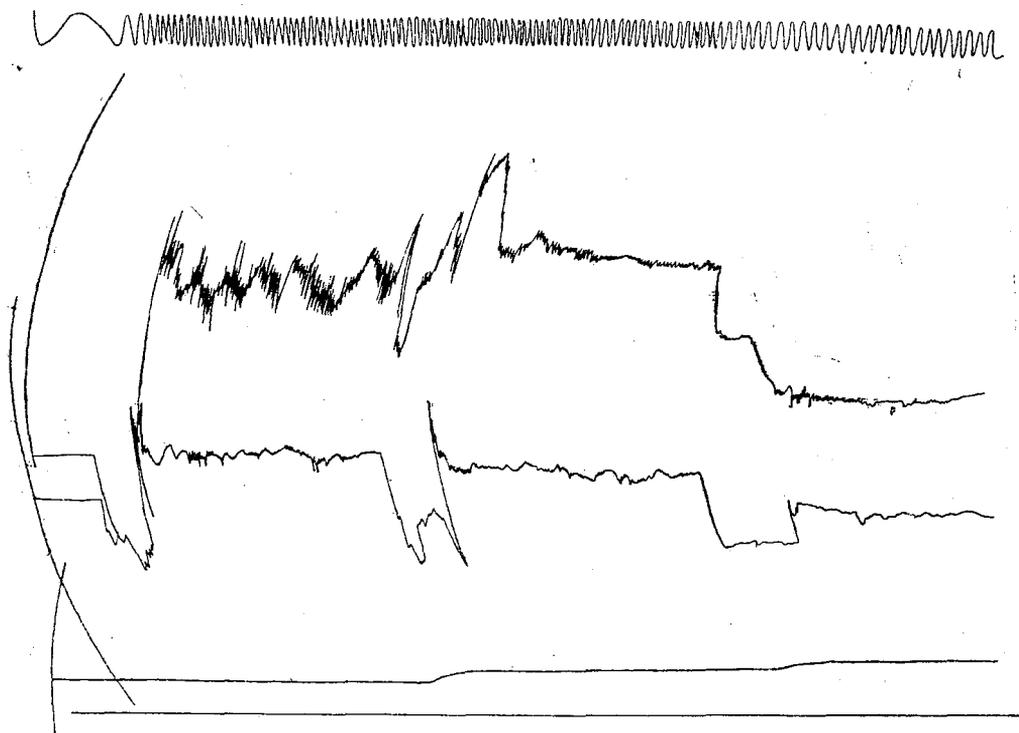


Рис. 1. Воейково, Подъем № 251, 28/IV 1952 г., 6 час. 00 мин. Прибор № 103.

кривая дает запись средней скорости ветра, вторая сверху — горизонтальную составляющую скорости ветра, третья сверху — запись вертикальных порывов, вторая кривая снизу — давление воздуха и самая нижняя — запись фиксированного пера. Прибор записывал структуру ветра на четырех уровнях — 3, 100, 200 и 300 м. Моменты подъема аэростата после 4-минутных площадок хорошо выделяются скачком на записи горизонтальной и вертикальной пульсаций. Эти участки в обработку не входят.

Запись порывистости балла V дана на рис. 2. Всего за период с января до сентября 1952 г. прибором с записью горизонтальной составляющей было проведено 162 подъема, из них за период январь — февраль сделано 52 записи, за период с 15 по 28 апреля — 110.

Для обработки лент с записью горизонтальной составляющей скорости ветра использовалась сетка, нанесенная на прозрачной пленке. Сетка имела параллельно прочерченные дуги через 1 мм, радиус кривизны которых соответствовал длине пера прибора. От фиксированной линии на сетке наносились параллельные линии через каждые 5 мм или через 0,25 м/сек. Расстояние между дугами в 1 мм соответствовало интервалу в 5 сек. Совмещая фиксированные линии пленки и записи прибора и снимая по тарировочным прямым значения скорости в точках пересечения дуги на пленках с линией записи на метеорограмме, получают скорости ветра через каждые 5 сек.

Как характеристики турбулентной структуры ветра были определены средние величины полупериодов нарастания и спада пульсаций $\tau/2$, величины периодов пульсаций τ , величины пульсаций скоростей Δv , средние значения скорости ветра v , так называемый фактор порывистости — отношение $\frac{\Delta v}{v}$ и путь, проходимый массой воздуха между двумя порывами, т. е. горизонтальные размеры вихря $L = v\tau$. Как видно в приведенной схеме обработки материала наблюдений, скорость турбулентного потока v разделена на осредненную \bar{v} и пульсационную Δv , т. е.

$$v = \bar{v} \pm \Delta v.$$

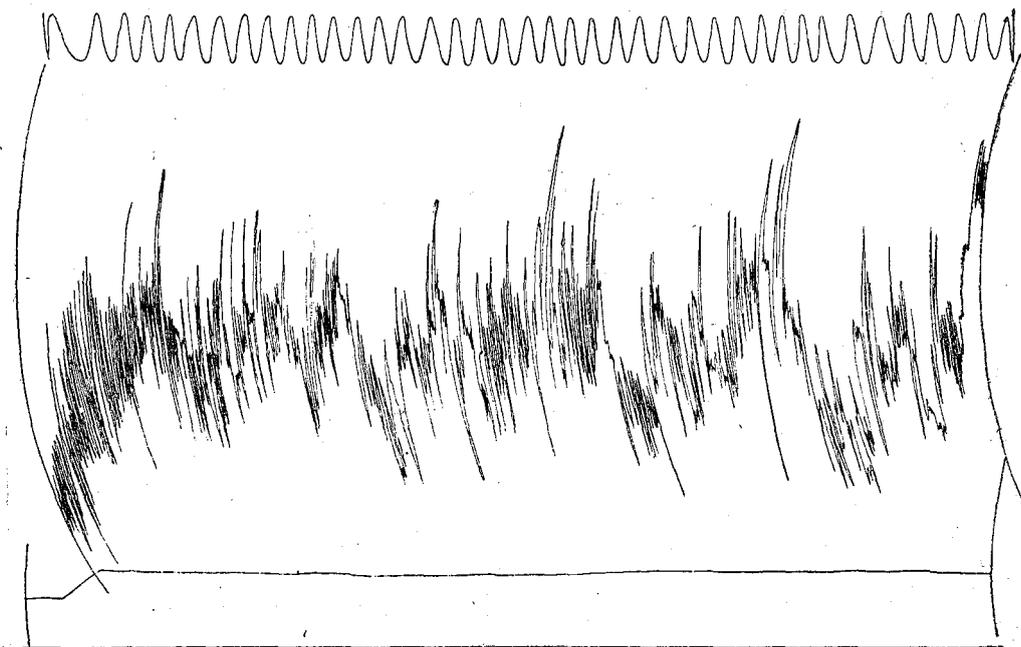


Рис. 2.

Период осреднения, как правило, принимался в 3—4 мин. В принятых приборах оборот барабана совершался за 18 мин. При такой скорости вращения можно было учитывать только качественно порывы с периодами порядка 1—4 сек. и дать количественную характеристику порывов с периодами не менее 5 сек. Для количественных характеристик порывов с периодами менее 5 сек. приходилось пользоваться прибором со временем оборота барабана в 45 сек.

Совершенно очевидно, что операция осреднения сглаживает все отклонения, период которых мал по сравнению с периодом осреднения, независимо от того, имеют ли они закономерный или случайный характер.

Этими приборами регистрируются в основном турбулентные образования относительно крупных размеров, обладающие наибольшей кинетической энергией.

На основании обработки материалов наблюдений за структурой ветра можно сделать некоторые ориентировочные выводы, в основном как иллюстрацию возможностей изложенного метода. Исходя из намеченных 6 баллов порывистости ветра, сделан подсчет некоторых элементов турбулентности для каждого из баллов. Получены значения средней скорости ветра \bar{v} м/сек., величины периода пульсаций τ сек., горизонтальных размеров вихря $L = v\tau$ м, средней величины пульсации скорости ветра Δv и фактора порывистости $\frac{\Delta v}{v}$. Результаты этих подсчетов даны в табл. 2 для периода с 15 по 28/IV 1952 г., а в табл. 3 — аналогичные данные для января — февраля 1952 г.

Характеристика структуры ветра за период с 15 по 28/IV 1952 г.

Балл порывистости	Высота, м	v м/сек.	τ сек.	$\frac{\pm \Delta v}{m/сек.}$	$\frac{\Delta v}{v}$	L м	Число случаев
I	3	3,5	—	0,1	—	—	17
	100	6,6	—	0,1	—	—	10
	200	7,3	—	0,1	—	—	10
	300	6,8	—	0,1	—	—	8
	Среднее . . .	6,0	—	0,1	—	—	45
II	3	4,8	20	0,26	0,05	96	2
	100	5,0	22	0,30	0,06	110	20
	200	5,3	23	0,38	0,07	122	13
	300	6,5	25	0,39	0,06	162	3
	Среднее . . .	6,4	22,5	0,37	0,06	122	38
III	3	6,3	14	0,80	0,13	88	5
	100	7,0	21	0,95	0,14	147	16
	200	7,6	23	0,80	0,11	175	12
	300	8,0	25	0,65	0,08	200	3
	Среднее . . .	7,2	20,7	0,80	0,12	152	36
IV	3	6,8	17	0,90	0,13	116	5
	100	7,2	17	1,40	0,19	123	6
	200	7,9	19	1,20	0,15	150	7
	300	9,1	22	1,49	0,16	200	2
	Среднее . . .	7,7	18,8	1,25	0,16	147	22
V	3	8,8	17	2,8	0,32	150	1
	100	8,1	16	1,5	0,18	130	3
	200	7,6	15	1,7	0,22	114	2
	300	—	—	—	—	—	—
	Среднее . . .	8,2	16,0	2,0	0,24	131	6

Следует еще раз отметить, что число случаев, взятое в табл. 2, недостаточно, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы, особенно по баллу V, но даже и в таком виде получают довольно хорошие характеристики каждого балла. Поскольку начальная чувствительность приемника порывистости 2,5 м/сек., то в обработку вошли только случаи, когда скорость ветра была больше 2,5 м/сек.

При скорости ветра больше 10—12 м/сек. подъемы аэростата не производились и поэтому величины средней скорости ветра получались ограниченными условиями метода исследования.

Подъемы в январе и феврале производились только в дневные часы и поэтому выделить суточный ход не представляется возможным, этим же объясняется, очевидно, отсутствие балла I порывистости и очень малое число наблюдений с баллом II порывистости.

Из приведенных в табл. 2 и 3 средних характеристик структуры турбулентного потока выделяются некоторые зависимости, подтверждающие особенности каждого балла порывистости. Средние скорости ветра на высоте 100 м растут от 5,0 м/сек. для балла II до 8,1 м/сек. для балла V; зимой средние скорости ветра для каждого балла несколько больше.

Хорошо выделяется увеличение фактора порывистости для баллов II и V. Величина L не имеет четкой зависимости от балла порывистости. Это, возможно, обусловлено малым числом наблюдений. Следует отметить рост L с высотой во всех случаях, кроме балла V (табл. 2).

На рис. 3 приведена намечающаяся линейная зависимость между величиной фактора порывистости и средней скоростью ветра; с ростом v увеличивается и величина фактора порывистости.

Характеристика структуры ветра за январь — февраль 1952 г.

Балл порывистости	Высота, м	v м/сек.	τ сек.	Δv м/сек.	$\frac{\Delta v}{v}$	L м	Число случаев
II	3	4,5	22	0,32	0,07	99	1
	50	6,3	19	0,5	0,08	120	2
	100	7,6	22	0,4	0,05	167	2
III	3	4,5	19	0,9	0,20	86	5
	50	7,0	19	0,95	0,13	143	11
	100	7,7	21	0,80	0,11	162	13
IV	3	6,4	18	1,40	0,22	115	3
	50	7,9	19	1,3	0,16	150	6
	100	8,2	22	1,5	0,18	181	5
V	3	—	—	—	—	—	—
	50	7,6	19	1,8	0,24	142	2
	100	8,9	19	1,8	0,20	151	2

Примечание. В первых расчетах балл порывистости определялся ориентировочно, не придерживаясь табл. 1.

Не получается четкой зависимости между средней скоростью ветра и величиной пульсаций скорости ветра, что объясняется, повидимому, малым числом измерений и неучетом фактора устойчивости атмосферы, который влияет на характер указанной зависимости.

Для выявления некоторых особенностей в структуре порывов произведена разбивка порывов, имеющих хорошо заметную периодичность, на два полупериода — один с нарастанием скорости, а другой с ее спадом — и произведен подсчет средних значений $\tau/2$, Δv и $\frac{\Delta v}{v}$ для нарастания и спада скоростей ветра, с разбивкой их по баллам порывистости. Эти данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Структура ветра по полупериодам пульсаций для высоты 100 м

Балл порывистости	Нарастание скорости			Спад скорости		
	$\tau/2$ сек.	Δv м/сек.	$\frac{\Delta v}{v}$	$\tau/2$ сек.	Δv м/сек.	$\frac{\Delta v}{v}$
II	11	0,33	0,09	11	0,27	0,07
III	10	0,70	0,13	11	0,76	0,13
IV	8	1,32	0,21	9	1,40	0,21
V	9	1,78	0,24	9	1,55	0,20

Полупериоды спада и нарастания порывов почти одинаковы для всех баллов, иногда только наблюдается небольшое увеличение продолжительности спада порывов.

С 15 по 28/IV 1952 г. была проведена серия наблюдений, во время которой отмечен довольно правильный суточный ход различных баллов порывистости. Утром с 5 и до 8—9 час., а иногда и до 11 час., при наличии приземных инверсий температуры поток имеет почти ламинарный характер, что по нашей схеме соответствует баллу I порывистости. После начала разрушения инверсии поток из

ламинарного переходит в слабо турбулентный. В дневные часы при условии развитой турбулентности наблюдается балл IV и реже балл V. В вечерние часы чаще всего наблюдались баллы III и II. Распределение баллов порывистости дано в табл. 5.

Характеристика распределения баллов порывистости в зависимости от высоты дана в табл. 6. В этой же таблице приведены значения температуры воздуха и скорости ветра у земной поверхности и наблюдения за облачностью.

В утренние часы наблюдается, как правило, ламинарный поток с отсутствием порывов или очень слабыми ее значениями — менее 0,1 м/сек. Этот поток вызван наличием приземной инверсии температуры, причем средние скорости ветра могут иметь и относительно большие величины — до 6—7 м/сек. Наличие слабо турбулентного потока в свободной атмосфере в слоях выше инверсии температуры неоднократно отмечал П. А. Молчанов [1]. Поток воздуха без порывов или с очень слабой турбулентностью отмечен от самой земной поверхности в слое приземной инверсии.

Например, запись на рис. 1 указывает, что развитие порывистости идет снизу, а следовательно, и приземная инверсия также будет уничтожаться в этом случае снизу вверх. После уничтожения инверсии температуры в атмосфере начинают

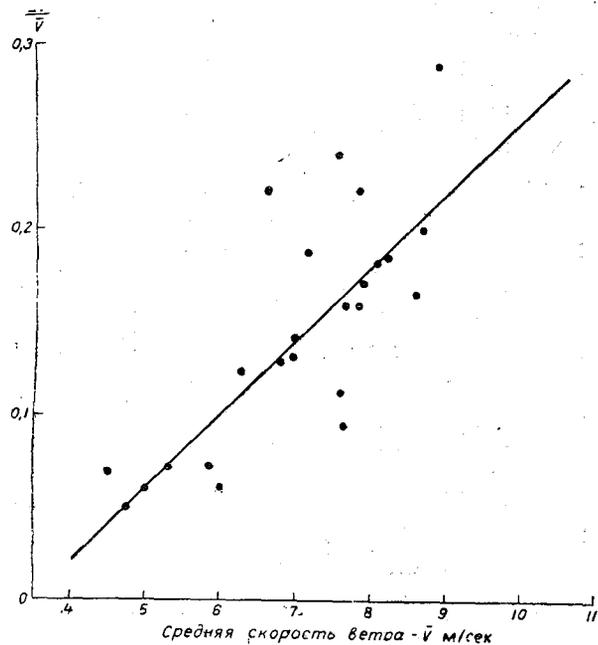


Рис. 3. Зависимость фактора порывистости от средней скорости ветра.

Таблица 5

Распределение баллов порывистости в зависимости от времени и условий распределения температуры за апрель

Число	Часы подъема					
	6—7	8—9	11—12	14—15	15—16	18—19
15	I—II ¹	II	III—IV	V	III	—
16	III	IV	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—
18	II	II—III	III	IV—V	—	—
19	—	—	—	III—II	II	—
20	II ¹	I ¹	II	IV—III	III	II
21	I	II—III	IV—V	V	—	—
22	—	—	I—II	I	I	I
23	II	I ¹	II ¹	III—IV	II	II
24	I ¹	II ¹	II—I ¹	II	II—III	—
25	—	—	—	—	—	—
26	I ¹	I ¹	I—II	II	II	II—I
27	II	I—II ¹	II—III	III—IV	III	—
28	II	I—II ¹	II	I	III—II	—

¹ Случаи с инверсией температуры.

Распределение баллов порывистости по высотам за апрель

Число	Время подъема час.—мин.	Облачность	Температура воздуха, град.	Скорость ветра, м/сек.	Высота, м			
					3	100	200	300
15	6—19	0/0	1,6	3,0	III	II—I	I	I
	9—28	1/0 Ci	8,3	3,5	I	II	II	I
	12—17	0/0	11,9	2,5	IV	IV	III—IV	—
	14—10	5/0 Ci, Cu	14,9	4,0	V	V	V	—
	17—35	1/0 Ci	14,2	3,5	II—III	III	III	III
16	6—25	4/3 Ac, Sc	2,6	5,0	III	III	II—III	II—III
	9—12	0/0	5,1	6,0	IV	IV	IV	IV
18	5—42	7/0 Ac	—0,8	2,0	II	II	II	—
	8—27	0/0	1,0	3,0	II	II—III	III	—
	11—23	2/2 Cu	4,6	4,0	III	III	III	III
	14—08	—	5,3	6,0	IV—V	V	V	—
19	15—50	3/3 Cu	4,1	3,5	III—II	II—III	III	—
	18—21	0/0	1,2	3,5	II	III	III	III
20	5—42	7/0 Ac	—2,2	5,0	I	I	I	I
	8—31	7/0 Ac	—1,1	4,0	I	I	I	—
	11—31	7/7 Sc	2,5	5,1	II	II	II	II
	14—43	7/7 Sc	4,5	4,0	III	IV	IV	IV—III
	17—13	8/8 Sc	0,8	3,2	II	II—III	II—III	II
21	5—35	10/10 St	—1,3	2,5	I	I	I	I
	8—17	10/10 St	0,9	5,1	II	III	III	—
	10—57	—	5,3	5,5	IV	IV—V	IV	—
	14—00	10/3 Ac, Sc	6,7	5,5	V	V	—	—
	16—23	10/0 Ac	8,0	6,0	IV	IV—V	IV	—
22	11—32	—	6,8	3,5	IV	II	II	—
	13—19	10/0 Ac	10,3	4,1	I	I	II	I
	16—04	10/0 Cs, Ac	12,1	1,9	I	I	I	—
	18—34	10/0 Ac	10,7	5,0	I	I	I	—
23	5—56	7/0 Ac	8,7	4,0	I	I	I	I
	8—25	—	12,1	4,6	I	I	I	I
	11—04	10/0 III	18,1	5,0	II	II	II	II
	14—13	10/10 St	21,0	4,2	IV—III	III	IV	IV
	16—58	10/10 Sc	19,7	2,2	I—II	II	II	II
	19—30	10/10 Sc	15,8	3,3	II	II	II	II
24	7—24	10/10 St	7,1	3,2	I	I	I	I
	9—49	10/10 St	9,2	2,0	II	II	II	II
	12—19	6/6 Sc	15,5	3,2	II	I	I	II
	15—03	10/0 Ac	12,9	1,5	II	II	II	II
	17—28	10/10 St	10,8	2,0	III—II	III—II	II	II
26	5—42	10/10 St	4,9	2,8	I	I	I	I
	8—13	10/10 St	7,9	3,8	I	I	I	I
	11—24	0/0	11,5	1,2	I	II	II	II
	14—21	0/0	12,9	1,0	II	II	II	II
	16—47	4/4 Sc	14,0	2,1	II	II	II	II
	19—15	10/10 Sc	8,8	3,1	I	II	II	I
27	5—42	9/0 Ac	5,3	2,5	I	I	I	I
	8—04	3/0 Ac	7,5	2,0	I—II	II	I	I
	10—15	1/0 Ac	11,6	5,0	II—III	II—III	II—III	II—III
	12—45	0/0	13,0	3,5	III—IV	IV	IV	IV
	15—31	0/0	15,3	4,5	III	III—IV	IV	IV
	18—01	0/0	13,0	3,0	III	III	III	III
	28	6—00	0/0	5,4	1,1	I	I—II	I
8—30	0/0	12,0	1,0	I	I—II	I—II	I—II	
11—19	0/0	17,8	1,0	II	II	II	II	
13—58	0/0	18,7	1,0	II	II	II	I—II	
16—24	0/0	19,3	2,0	II—III	III	III	II	

развиваться вихри с большими периодами и очень малой амплитудой, т. е. возникает балл II порывистости, а затем балл III.

В дневные часы периоды пульсаций начинают еще больше уменьшаться, а амплитуды их расти, в результате образуются баллы IV и V порывистости. К вечеру порывистость снова начинает ослабевать и к 17—19 час. доходит до балла II, а иногда до балла I. Таков в общих чертах суточный ход порывистости ветра в нижнем слое атмосферы весной в дни с антициклональным типом погоды.

Распределение баллов порывистости ветра с высотой в нижнем 300-метровом слое показывает, что в 55% всех случаев сохраняется постоянным балл порывистости ветра с высотой, причем в 30% всех случаев в 300-метровом слое наблюдается почти ламинарный поток воздуха. Следует отметить, что при многочисленных измерениях П. А. Молчанова ламинарное движение наблюдалось им сравнительно редко; это обстоятельство было вызвано особенностями метода подъема приборов: на змеях — змеи могли подниматься только при наличии ветра со скоростями не менее 3—4 м/сек. Поэтому естественно, что случаи со штилем или слабыми скоростями ветра у земной поверхности, при которых, как правило, и наблюдается приземная инверсия, из материалов П. А. Молчанова выпали.

При балле V порывистости подъемы аэростата часто не производились из-за сильного ветра, поэтому повторяемость этого балла получилась возможно несколько преуменьшенной.

В общем ярко выраженных изменений баллов порывистости с высотой до 300 м. в этот период года не обнаружено.

Приведем зависимость баллов порывистости ветра от величины числа Ричардсона (см. табл. 7)

$$Ri = \frac{\gamma_a - \gamma}{\frac{dv}{dz}} g/T,$$

где γ_a — адиабатический вертикальный температурный градиент, γ — наблюдаемый вертикальный температурный градиент, $\frac{dv}{dz}$ — градиент вектора ветра, T — средняя температура слоя воздуха.

Таблица 7

Значение числа Ri при различной порывистости для периода 15—28/IV

Высота, м	Балл порывистости									
	I		II		III		IV		V	
	Ri	Число случаев	Ri	Число случаев	Ri	Число случаев	Ri	Число случаев	Ri	Число случаев
100	2,6	12	-0,20	21	1,90	10	-2,02	8	-0,76	3
200	21,6	15	0,05	21	0,18	8	0,02	8	-0,14	1
300	14,8	8	0,12	12	2,28	6	-0,68	7	—	—
Среднее для всех высот	13,3	35	0,06	54	1,18	30	-1,29	23	-0,66	4

Балл I порывистости встречается исключительно при положительных значениях Ri, причем величина Ri весьма велика почти на всех высотах. Баллы II и III порывистости ветра имеют место в основном также при положительных значениях числа Ri, и только баллы IV и V наблюдаются при отрицательных его значениях. Малое число случаев не позволяет получить более четкие разделения условий образования каждого балла порывистости.

Опыт вычисления структурных функций горизонтальной составляющей ветра

А. Н. Колмогоровым и А. М. Обухова в 1941 г. [2] предложен метод статистических характеристик, относящихся не к самим значениям турбулентного поля, а лишь к разностям этих значений в двух точках поля. Если две точки наблюдений находятся в одинаковых макроскопических условиях, то разность значений скорости потока является статистически устойчивой и ее среднее значение можно считать равным нулю.

Зависимость среднего квадрата разности характеристик поля в двух точках от расстояния между точками называется структурной функцией данного поля. Знание структурной функции поля скоростей дает определенные сведения о спектре турбулентности.

В наших расчетах структурной функции вместо разности скоростей ветра по расстоянию определялась разность скоростей по времени в одной точке. Разности скоростей в м/сек. вычислялись за следующие промежутки времени: $\Delta t = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60$ сек. Подсчитанные значения разностей определялись для каждого промежутка времени Δt на протяжении всей площадки продолжительностью около 3—4 мин. Вычисление среднеквадратичных разностей было заменено, для облегчения обработки, вычислением средних абсолютных из значений. Для определения среднеквадратичных значений σ был вычислен по средним абсолютным их значениям, на основании обработки трех записей, переводной множитель. Для вычисления σ была принята формула

$$\sigma = 1,33 \Delta \sigma.$$

Заметим, что множитель 1,33 не намного отличается от полученного А. М. Обуховым [3] значения 1,29 и от величины 1,25, соответствующей закону Гауса.

Результаты вычислений σ для каждого из баллов порывистости даны в табл. 8. Данные табл. 8 нанесены на рис. 4. Для всех четырех баллов порывистости хорошо выделяется зависимость σ от Δt , вначале с относительно быстрым ростом величины σ_v почти до максимума, после которого наблюдаются уже незначительные изменения σ_v с ростом Δt . На рис. 4 ясно выделяется существование начального значения σ_0 , отличного от нуля, хотя величина σ_0 должна быть равна нулю. М. И. Юдин [4] рекомендует для уменьшения ошибок обработки и выделения микроструктуры пульсаций наносить на график не величину σ_v , а σ_v^2 . На рис. 5 дано распределение σ_v^2 в зависимости от Δt ; на этом графике практически все кривые начинаются от нуля.

Таблица 8

Величина σ м/сек. для разных значений Δt сек.

Балл порывистости	Δt сек.								Число случаев
	5	10	15	20	25	30	40	60	
II	0,25	0,36	0,43	0,47	0,49	0,52	0,54	0,58	11
III	0,37	0,49	0,58	0,64	0,68	0,69	0,76	0,83	13
IV	0,94	1,17	1,27	1,39	1,42	1,44	1,55	1,53	10
V	1,20	1,34	1,50	1,62	1,66	1,63	1,66	1,62	4

Ввиду того что определение структурной функции атмосферы представляет большой практический и теоретический интерес, мы проверили закон двух третей по результатам зависимости σ_v от Δt .

Имеющимся в нашем распоряжении материалов было недостаточно, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы, но некоторые предварительные заключения привести возможно.

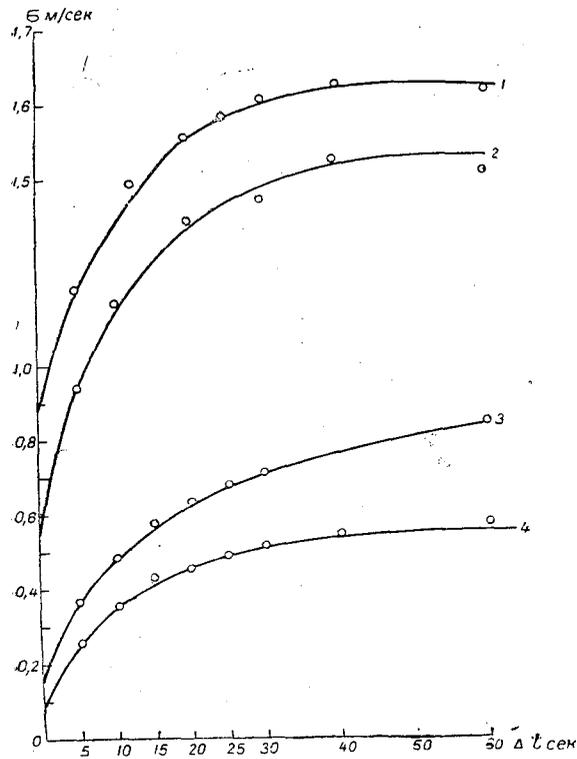


Рис. 4. Зависимость σ от Δt для разных типов порывистости ветра.

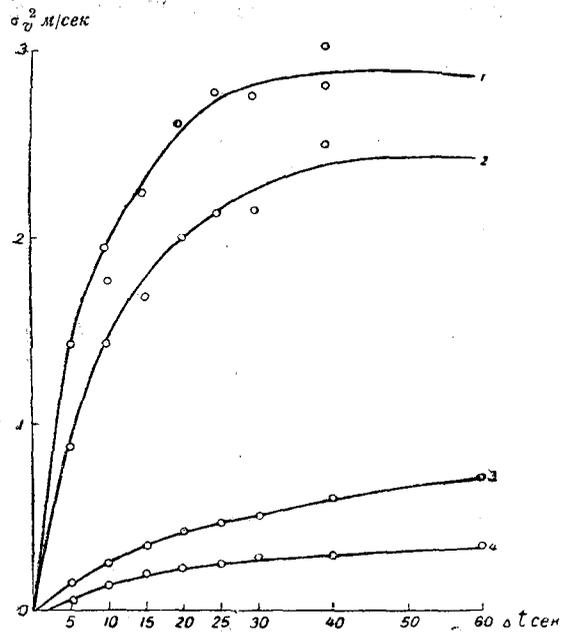


Рис. 5. Зависимость σ_v^2 от Δt для разных типов порывистости ветра.

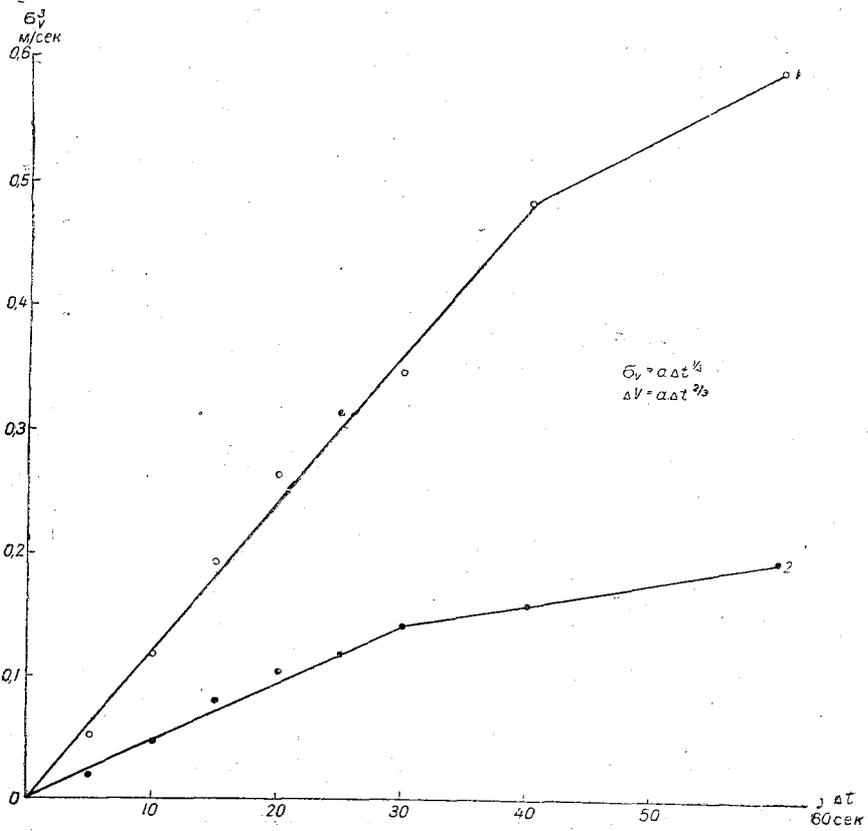


Рис. 6. Зависимость σ_v^3 от Δt для типов II и III порывистости ветра.

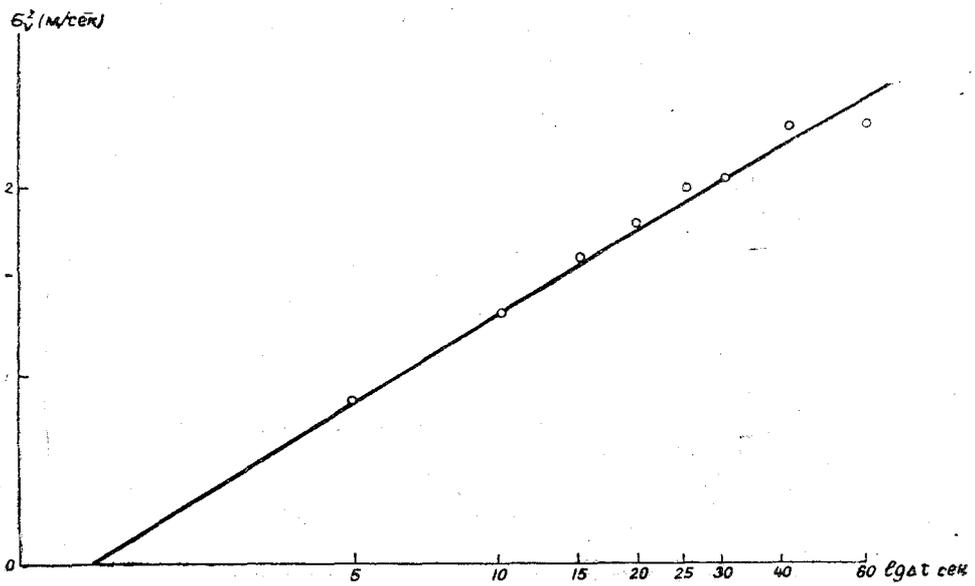


Рис. 7. Зависимость σ_v^2 от $\lg \Delta t$ для типа IV порывистости ветра.

На рис. 6 приведен график, на котором для баллов II и III порывистости нанесены по оси абсцисс величины Δt сек., по оси ординат — σ_v^3 , почти все точки укладываются на прямую. Таким образом можно считать, что при баллах II и III порывистости применим закон двух третей между величиной Δv и Δt , а именно

$$\Delta v = a (\Delta t)^{2/3},$$

или для среднеквадратичной разности мгновенных пульсаций

$$\sigma_v = a (\Delta t)^{1/3}.$$

Для балла IV порывистости зависимость между σ_v и Δt нанесена на рис. 7 и может быть выражена следующей формулой:

$$\sigma_v^2 = a \lg \Delta t,$$

т. е.

$$\sigma_v = a (\lg \Delta t)^{1/2} + b.$$

Зависимость получается пропорциональной логарифму Δt . Ввиду малого числа случаев, для балла V порывистости зависимость установить не удалось.

Краткие ориентировочные выводы¹

1. Для слабой и умеренной порывистости (баллы II и III) в слое до 300 м намечается оправдываемость закона двух третей между средними значениями разности амплитуды порывов и временем.

2. Для сильной порывистости (балл IV) эта зависимость выражается через логарифм времени.

Регистрация порывистости ветра на быстро вращающемся барабане

Разработанный прибор имел два часовых механизма — один с оборотом 18 мин., другой — 45 сек. Пуск барабана часового механизма, имеющего оборот в 45 сек., происходил автоматически, через любой заданный промежуток времени. Скорость вращения барабана составила 5 мм за 1 сек. При такой скорости можно было зарегистрировать пульсации с полупериодами, начиная с 0,2 сек. Пример записи микропульсаций дан на рис. 8. На записи верхняя кривая дает горизонтальные пульсации, нижняя — вертикальные пульсации.

Количество имеющихся записей было относительно невелико для того, чтобы сделать какое-либо общее заключение. Для иллюстрации приводим результаты обработки двух лент (табл. 9).

Таблица 9

Результаты обработки лент с записью микропульсаций воздушного потока

Дата	Время, час.—мин.	H м	v м/сек.	Горизонтальные порывы			
				рост		спад	
				$\tau/2$	Δv	$\tau/2$	Δv
19/V	11—54	100	7,6	1,4	1,53	1,4	1,75
20/V		110	5,0	1,0	1,90	0,9	1,82

¹ Выводы автора имеют предварительный характер и требуют подтверждения на большом экспериментальном материале. Кроме того, необходимо физическое и теоретическое обоснование полученных выводов, что автором пока не сделано. (Ред.)

Из обработки лент с записью микропульсаций видно, что горизонтальную порывистость по принятой шкале следует отнести к баллу V, т. е. к очень сильной порывистости; величина фактора порывистости составляет 0,21 и 0,37. Периоды микропульсаций горизонтальной составляющей 2—3 сек., т. е. в 8—10 раз меньше, чем макропульсаций. Прибор с медленно вращающимся барабаном не мог бы регистрировать такие мелкие пульсации.

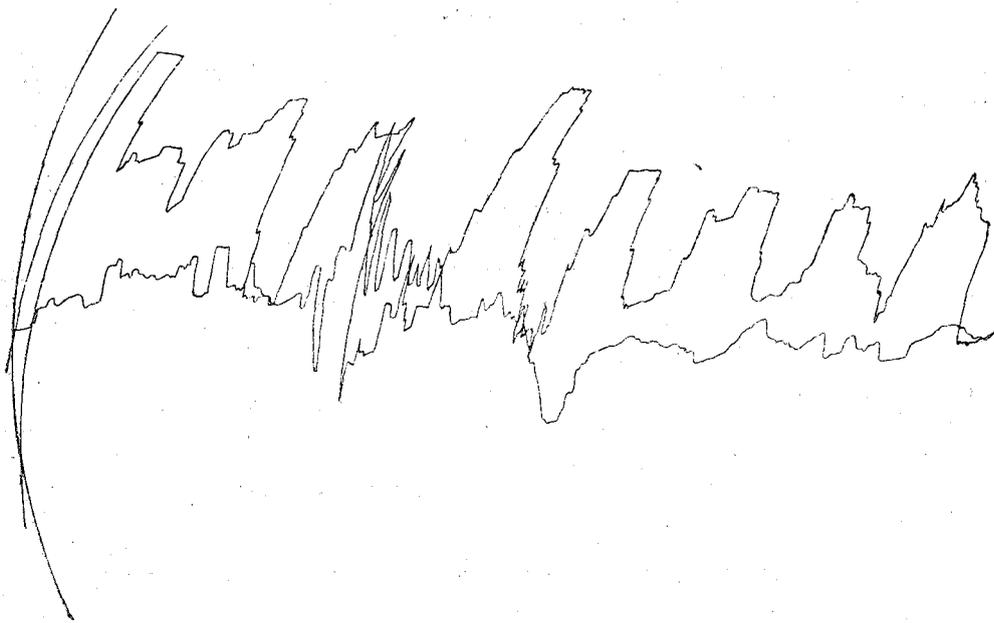


Рис. 8. Воейково. Подъем № 266, 19/V 1952 г., 11 час. 54 мин. Прибор № 103, 45-секундный оборот барабана.

Получение большого количества материалов наблюдений с регистрацией на быстро вращающемся барабане позволит выяснить более детальную картину строения мелких турбулентных образований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов П. А. Аэрология. Гидрометеониздат, 1938.
2. Обухов А. М. К теории атмосферной турбулентности. Изв. АН СССР, серия физич., № 1—2, 1942.
3. Обухов А. М. Характеристики микроструктуры ветра в приземном слое атмосферы. Изв. АН СССР, серия географ., № 3, 1951.
4. Юдин М. И. Некоторые вопросы теории метеорологических полей. Труды ГГО, вып. 19, 1950.

ОБ ИНВЕРСИЯХ СНЕГОТАЯНИЯ

В начале 20-х годов П. А. Молчанов [1—2] установил существование приземных инверсий, связанных с таянием снежного покрова, и указал, что погода, сопутствующая этим инверсиям, резко отличается от погоды, присущей другим приземным инверсиям.

Эти инверсии вошли в аэрологию под названием весенних, или снежных. Так как инверсии этого рода встречаются не только весной (хотя в умеренных широтах преимущественно весной), но и осенью и даже зимой, а в полярных областях летом, то называть их весенними нецелесообразно. С другой стороны, наименование „снежные“ не отражает их основной специфики. При наличии снежного покрова более обычными являются радиационные инверсии. Чтобы подчеркнуть отличие от этих распространенных инверсий, нам кажется более подходящим название „инверсии снеготаяния“. Таким термином пользовался и И. М. Бушев [3]. Причиной возникновения рассматриваемых инверсий является таяние снега при вторжении теплых воздушных масс. Процесс таяния снега связан с поглощением колоссальных количеств тепла, что приводит к понижению температуры воздуха у земной поверхности.

Инверсии снеготаяния сопровождаются пасмурной погодой, слоистой облачностью, слабо выраженным суточным ходом температуры, сильным и устойчивым ветром у земли, возрастающим с высотой, т. е. условиями, типичными для передней части циклона. В обычных условиях эти факторы ведут к разрушению инверсий.

П. А. Молчанов приводит в своей статье [1] 11 случаев весенних инверсий по наблюдениям Павловской аэрологической обсерватории. Только в четырех из них инверсии начинались непосредственно от земли. Основания инверсий чаще всего отмечались на высоте 300—400 м, а в одном случае основание инверсии оказалось приподнятым даже до высоты 1160 м.

После этих первых данных инверсии снеготаяния не подвергались специальному рассмотрению и упоминались в аэрологических работах лишь вскользь, подобно статье И. М. Бушева [3]. Приведем ниже некоторые характеристики инверсий снеготаяния, полученные на основании аэрологических наблюдений, выполненных в последние годы.

Наиболее интересными характеристиками этих инверсий являются: их мощность, т. е. толщина слоев, в которых они наблюдаются, и высота, до которой эти инверсии бывают подняты над землей.

Для выяснения указанных характеристик рассмотрен материал вертикального зондирования атмосферы при оттепелях в снежные периоды трех лет (1947—1949 гг.) по двум пунктам: в одном — самолетное зондирование, в другом — радиозонды. Оба пункта расположены на расстоянии 3 км один от другого. Основным материалом являлись подъемы радиозондов.

Рассматривались как весенние оттепели, так и осенние. В эти периоды набралось 86 зондирований. Во всех случаях у земли наблюдался сильный ветер. Средняя скорость его из всех 86 случаев 7,5 м/сек. В отдельные сроки наблюдений скорость доходила до 18 м/сек., а иногда превышала и это значение, но зондирование тогда не удавалось.

Такие сильные ветры должны препятствовать возникновению глубоких инверсий у земной поверхности. В результате сильного перемешивания воздуха слои инверсии могут оказаться оторванными от земли и приподнятыми на некоторую высоту. Это может привести также к тому, что понижение температуры, вследствие потери тепла на таяние снега, распределяется на очень большие слои, и тогда инверсия может ослабевать по глубине, переходя в изотермию и даже в слой с малыми положительными градиентами мощностью до 2—3 км. Такое явление и наблюдается в действительности: из рассмотренных 86 случаев инверсия началась от земли только в 30 случаях.

По имеющимся данным, высоты, на которых наблюдаются инверсии, могут варьировать в очень широких пределах — от земли до 1,5—2 км. Средняя же высота их оказалась равной 400 м.

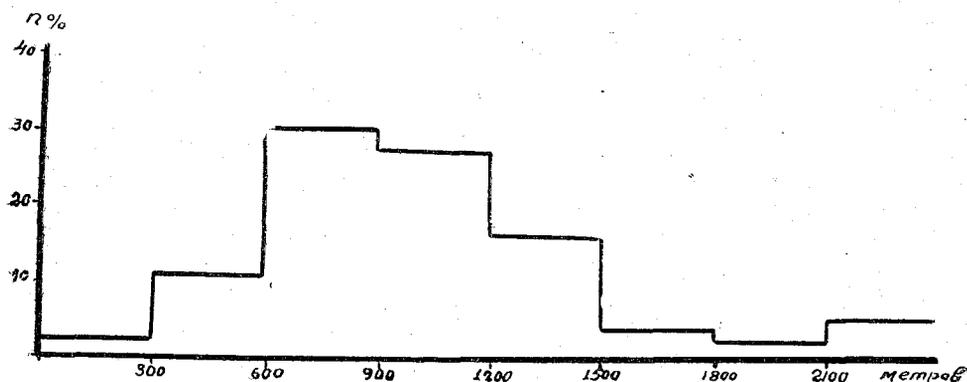


Рис. 1. Повторяемость инверсий различной мощности (%).

Повидимому, высота начала инверсии $H_{инв}$, равная 300—400 м, а также значительная повторяемость начинающихся у земли инверсий (35—40%) являются довольно типичными для инверсий снеготаяния. Это подтвердилось более полными данными радиозондирований последних лет.

В тринадцати случаях, рассмотренных нами в нижних 3 км, инверсий не было вовсе. Правда, в трех случаях из них наблюдалось замедленное убывание температуры с высотой (градиент порядка 0,25—0,3°/100 м) и в двух случаях инверсии находились в более высоких слоях, мощность их была небольшой и есть основание считать, что они не имели отношения к процессу таяния снега.

Средняя скорость ветра для случаев, когда не наблюдались инверсии, хотя таяние снега имело место, была 12 м/сек.

Как уже сказано выше, из-за сильного перемешивания воздуха инверсии снеготаяния могут распространяться на очень большие слои. Вопрос о том, какой порядок имеют эти инверсионные слои, т. е. вопрос о мощности инверсий, является, пожалуй, наиболее интересным.

По данным П. А. Молчанова, мощность инверсий колебалась от 120 до 700 м. Среднее значение ее 310 м. В рассмотренных же нами случаях она колебалась от 50 до 2000 м. Среднее значение ее получилось 1026 м.

Повидимому, это происходит из-за ограниченных возможностей змейкового метода, применение которого и доступная высота подъема зависят от метеорологических условий.

Наиболее частыми являются инверсии мощностью 600—900 м. Повторяемость инверсий различной мощности показана на рис. 1.

Средний градиент температуры в инверсиях был равен $-0,18^\circ/100$ м. Нередки случаи, когда он доходил до значения $-3^\circ/100$ м. Правда, слои с такими высокими градиентами обычно не превышали 250—300 м.

В преобладающем большинстве случаев оттепели у нас были связаны с западными и южными направлениями ветра. На рис. 2 дана роза ветров для дней с по-

ступлением теплых масс воздуха в холодную половину года. Западные ветры резко преобладают над другими, в том числе и над южными; ветры северной половины при оттепелях чрезвычайно редки (3 случая из 86).

Как показывают данные наблюдений над снежным покровом, высота его при соответствующих условиях может за сутки уменьшиться на несколько сантиметров как за счет таяния снега, так и за счет уплотнения его. Средняя плотность свежеснежавшего снега при небольших положительных температурах (от 0 до 2°) почти в 2 раза больше, чем при небольших отрицательных температурах, а именно 0,18° в первом и 0,11° во втором случае. Максимальные же значения плотности снега при положительной температуре, как показывают наблюдения в одном из рассматриваемых пунктов, а также данные Б. П. Кароль, имеют величину до 0,5—0,6 г/см³.

Можно примерно оценить количество тепла Q , идущее из воздуха на таяние снега. Очевидно, оно должно быть равно

$$Q = Mc(t_0 - t_1) + ML,$$

где M — масса снега, c — теплоемкость снега, $t_0 - t_1$ — разность температур поверхности снега в момент прихода теплого воздуха и в момент, когда началось таяние, L — скрытая теплота таяния снега.

Если рассматривать 1 см² подстилающей поверхности, то масса снега, растаявшего на нем, будет равна

$$M = \rho_* \Delta h,$$

где ρ_* — плотность снега, Δh — разность высот снежного покрова, равная количеству снега, растаявшего на единичной поверхности.

Следовательно, можно написать

$$Q = \rho_* \Delta h [c(t_0 - t_1) + L],$$

или, учитывая, что температура тающего снега равна нулю, получим

$$Q = \rho_* (L - ct_1) \Delta h.$$

Примем плотность тающего лежалого снега $\rho_* = 0,4$, теплоемкость его $c = 0,5$ и температуру поверхности снега до прохождения теплого фронта около $t_1 = -5,0^\circ$. Скрытая теплота таяния $L = 80$ кал. Высота снежного покрова за 12 час. (между сроками 7 и 19 час.), как правило, в эти дни уменьшается на 3—4 см и в отдельных случаях — на 7—8 см.

Следовательно, примерное количество тепла, забираемое из воздуха 1 см² поверхности, будет равно $Q = 0,4(80 + 0,5 \cdot 5) 4 = 132$ кал., а 1 м² снежной поверхности — 1 320 000 кал. Так как это тепло берется из воздуха, то можно написать

$$Q = 1\,320\,000 = M_1 c_p \Delta T,$$

где M_1 — масса воздуха, отдающего тепло, c_p — теплоемкость воздуха, ΔT — понижение температуры воздуха из-за отдачи тепла нижним слоям и подстилающей поверхности.

Очевидно,

$$M_1 = \rho z,$$

где ρ — плотность воздуха, z — высота столба воздуха, отдающего тепло.

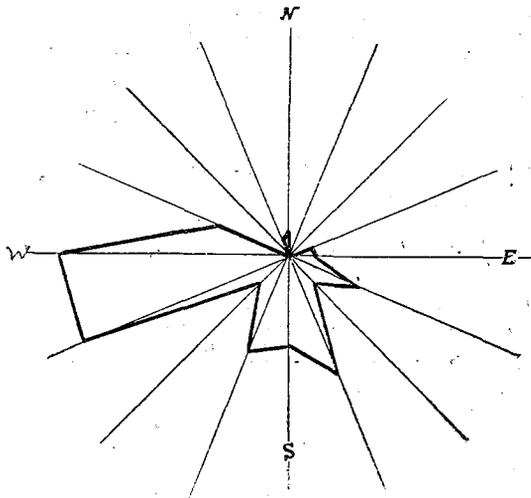


Рис. 2. Повторяемость направлений ветра по 16 румбам в дни со снеготаянием

Возьмем $c_p = 0,241$, $\rho = 1242 \text{ г/м}^3$, что соответствует давлению на высоте около 400 м, полученной как средняя высота основания инверсий, и температуре около 0° .

Далее примем, что температура в столбе воздуха вследствие теплоотдачи понизилась на 3° . Тогда $Q = 1\,320\,000 = \rho z c_p \Delta T = 1242 \cdot 0,241 \cdot 3 \cdot z = 1197,3 z$; отсюда $z \approx \frac{1\,320\,000}{1\,200} \approx 1100 \text{ м}$, что хорошо согласуется с полученной средней мощностью инверсий, т. е. слоев, температура которых понижается вследствие таяния снежного покрова.

Подсчитаем потоки тепла, которые будут возникать при таких инверсиях. Эти расчеты произведем методом, предложенным Д. Л. Лайхтманом для подсчета потоков тепла в почве [5,6].

Уравнение турбулентной диффузии имеет вид

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z},$$

где k — коэффициент турбулентности, $\frac{\partial s}{\partial z}$ — градиент переносимого в результате диффузии свойства.

В рассматриваемом случае s — количество тепла, которое, очевидно, равно

$$s = \rho c_p T \text{ кал/см}^3,$$

где T — температура воздуха, ρ — плотность воздуха, c_p — теплоемкость воздуха. Интегрируем это уравнение диффузии от 0 до высоты инверсии H :

$$\int_0^H \frac{\partial s}{\partial t} dz = k \left. \frac{\partial s}{\partial z} \right|_0^H.$$

Подставляя сюда вместо s его значение $s = \rho c_p T$ кал/см³ и учитывая, что в точках экстремумов $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, получим поток тепла

$$\rho c_p \int_0^H \frac{\partial T}{\partial t} dz = - \rho c_p k \frac{\partial T}{\partial z} = P. \quad (*)$$

Отсюда видно, что поток тепла P можно вычислить и не зная коэффициента турбулентности k .

Для вычисления необходимо найти значение интеграла $\int_0^H \frac{\partial T}{\partial t} dz$, что делается графическим методом по результатам двух последовательных зондирований атмосферы. Зная этот интеграл, можно найти и коэффициент турбулентности при предположении, что поток не меняется по высоте. (Это можно считать выполненным в наших случаях.)

Действительно из уравнения (*) очевидно:

$$k = - \frac{\int_0^H \frac{\partial T}{\partial t} dz}{\frac{\partial T}{\partial z}} = - \frac{\int_0^H \frac{\partial T}{\partial t} dz}{\gamma},$$

где γ — вертикальный градиент температуры.

Такие вычисления были проделаны для нескольких случаев инверсий. Правда, таких случаев было немного. Зондирования производились 2 раза в сутки, и поэтому полученные значения являются средними за довольно большой промежуток времени — половину суток, а иногда и за целые сутки.

Адвекция учитывалась введением в формулу соответствующего члена $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\infty}$.
Вычисления велись по формуле

$$P = c_p \rho \int_0^H \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\infty} \right] dz.$$

В результате вычислений получено среднее значение для турбулентного потока тепла во время инверсий снеготаяния: $P = -0,055$ кал/см² мин.

Средний для слоя коэффициент турбулентности, вычисленный указанным выше способом по потоку тепла и вертикальному градиенту температуры, получился равным 7,7 м²/сек.

Как сказано выше, мы получили среднее значение потока, равное $-0,055$ кал/см² мин.

Если предположить, что такое значение потока остается постоянным в течение 24 час., то 1 см² поверхности получит количество тепла $Q = 0,055 \cdot 60 \cdot 24 = 79,2$ кал. Это количество тепла может снизить высоту снежного покрова на 2—3 см, что является величиной вполне реальной и часто встречающейся.

Проведенные расчеты подтверждают роль снеготаяния в развитии инверсий. Однако окончательное решение задачи об инверсиях снеготаяния требует специально поставленных наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов П. А. Весенние инверсии. Мет. вестн., т. XXXII, № 1—4, 1922.
2. Молчанов П. А. Аэрология. Гидрометеиздат, Л. 1938 г.
3. Бушев И. М. Инверсии температуры в нижней тропосфере и состояние воздуха в приземном слое. Метеорология и гидрология, 1939, № 2.
4. Кароль Б. П. Снежный покров. 1949.
5. Труды ГГО, вып. 20, 1949.
6. Труды ГГО, вып. 22, 1950.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ВЕТРА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГГО

Воздушный поток, перемещаясь вдоль земной поверхности, с ее разнообразными видами рельефа и почвы и часто с резкими различиями в распределении температуры почвы, подвергается весьма значительным возмущениям.

Считается, что ламинарный поток воздуха неустойчив даже по отношению к очень малым возмущениям, под действием которых он распадается на ряд вихрей большого масштаба; эти вихри также оказываются неустойчивыми и дробятся на более мелкие. В самых мелких вихрях, с размерами около 0,5 см, кинетическая энергия потока переходит в тепловую.

Таким образом, в каждый данный момент в атмосфере существует совокупность вихрей самых различных масштабов и периодов. Турбулентное состояние движущегося воздушного потока в атмосфере создает весьма сложные структурные поля таких метеорологических элементов, как температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра и ряда других.

В настоящее время широко проводятся как экспериментальные, так и теоретические исследования турбулентности воздушного потока. Особенно велики в этой области достижения советских ученых, далеко опередивших зарубежную науку. Современная теория развитого турбулентного потока, созданная советскими учеными — А. А. Фридманом, А. Н. Колмогоровым и его школой, М. И. Юдиным и др., указывает на ряд закономерностей в структуре атмосферной турбулентности, которые экспериментально все же еще пока мало исследованы, особенно в слоях атмосферы выше приземных. Вблизи земной поверхности атмосферная турбулентность сильно искажается подстилающей поверхностью. В наиболее чистом виде структура воздушного потока может наблюдаться только на некоторой высоте от земной поверхности. Экспериментальных исследований в нижних слоях атмосферы было очень мало и результаты этих исследований пока весьма незначительны.

В этой работе мы остановимся на разборе методов и приборов, применяемых нами для исследования структуры воздушного потока в нижнем слое (до 1 км), наиболее важном для выяснения связей между землей и свободной атмосферой. В начале статьи дан краткий анализ исследований данного типа, проводимых с помощью самолетов и уравновешенных шаров-пилотов, а далее приведен разбор прибора для исследования структуры ветра с помощью привязных аэростатов.

Самолетные подъемы

Исследование структуры воздушного потока на самолете возможно проводить с помощью акселерографа, акселерометра и записей специального самолетного метеорографа, а также с помощью субъективной оценки степени болтанки самолета бортаэрологом.

Наибольший интерес для исследования микроструктуры воздушного потока представляет применение акселерографа. Не будем вдаваться в детали устройства прибора, техники обработки записей величин ускорения силы тяжести и других вопросов. Все это можно найти в работах Н. З. Пинуса [2], А. С. Дубова [3], А. Б. Калиновского и Н. З. Пинуса [4] и в работе автора, помещенной в данном сборнике (стр. 3).

Измерениями по акселерографу можно получить следующие наиболее важные числовые характеристики турбулентного потока: величины вертикальных пульсаций, числа порывов, амплитуды пульсаций, размеры вихрей, величины коэффициентов турбулентного обмена.

К отрицательным сторонам метода нужно отнести большие искажения, вносимые самолетом в воздушный поток, невозможность получить колебания горизонтальной составляющей воздушного потока, а также трудоемкость обработки лент акселерографа.

Применяемый нами переделанный акселерограф ЗП-11 обладает следующими данными:

Точность измерения вертикальных порывов	$\pm 0,2$ м/сек.
Минимальный период регистрации перегрузок	0,1 сек.
Регистрация возмущений, создаваемых воздушным потоком с горизонтальными размерами вихря ¹	от 3 м
Регистрация перегрузок в пределах	± 1 g
Скорость развертки	8 мм/сек.
Ширина ленты	100 мм
Снятие отсчета	до 0,01 g
Длина ленты на барабане	10 м

Техника полета с акселерографом и продолжительность отдельной регистрации должна определяться заданием. Например, при исследовании особенностей структуры воздушного потока над степью и лесными полосами, в Каменной Степи полеты проводились по горизонтальным площадкам на высотах 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1,0 и 1,5 км, продолжительность же одной регистрации составляла от 30 до 50 сек. Таким образом, на одной ленте акселерографа можно было получить от 20 до 40 площадок.

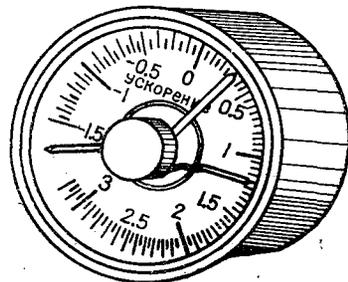


Рис. 1.

Как показал опыт работы с прибором, продолжительность одной регистрации должна быть около 60 сек., что дает для самолета ПО-2 минимальные размеры обследуемого участка земной поверхности в 2 км.

Другим прибором, фиксирующим размеры перегрузок, испытываемых самолетом, является акселерометр.

Прибор выпускается нашей промышленностью в серийном производстве и имеет шкалу перегрузок в пределах $+9$ g и $-4,5$ g. Для использования прибора по исследованию структуры воздушного потока необходимо повысить его чувствительность по крайней мере в 3 раза. Это делается путем замены грузиков в 3 раза более тяжелыми грузиками. Вид прибора дан на рис. 1. Прибор после переделки дает величины регистрируемых перегрузок в пределах от $+3$ g до $-1,5$ g. Практика работы с этим прибором показала, что отсчеты перегрузок приходится брать по максимальному расхождению стрелок; прибор будет указывать максимальные величины перегрузок за выбранный отрезок времени (обычно 30—60 сек.). Переводной множитель для перехода от показаний акселерометра к величинам вертикальных пульсаций может быть найден по формуле

$$\omega_z = k \Delta n,$$

Δn — величина перегрузок в долях g, k — коэффициент, зависящий от типа самолета.

В формуле опущен член, характеризующий короткопериодные пульсации воздушного потока, и оставлена только пульсация, создаваемая длиннопериодными возмущениями. Если акселерометр будет давать устойчивые показания, то его можно с успехом применять в дополнение к субъективной оценке болтанки самолета бортаэрологом.

Акселерограф и акселерометр хорошо реагируют на резкие короткопериодные изменения вертикальной составляющей воздушного потока. Если же самолет

¹ Практически минимальные размеры вихря должны быть соизмеримы с размерами самолета.

попадает в длиннопериодные восходящие или нисходящие потоки, то эти приборы ничего не покажут.

Для регистрации и исследования такого рода вертикальных движений в ГГО был переделан самолетный метеорограф; в приборе увеличена скорость вращения барабана в 2,5 раза (до 0,07 мм/сек.) и увеличена чувствительность приемника давления до 1,6 мб на 1 мм ординаты, поэтому изменение высоты может быть определено с точностью до 3—5 м. Прибор регистрирует также температуру и влажность воздуха и воздушную скорость самолета, имеется фиксированное перо и перо, снаб-

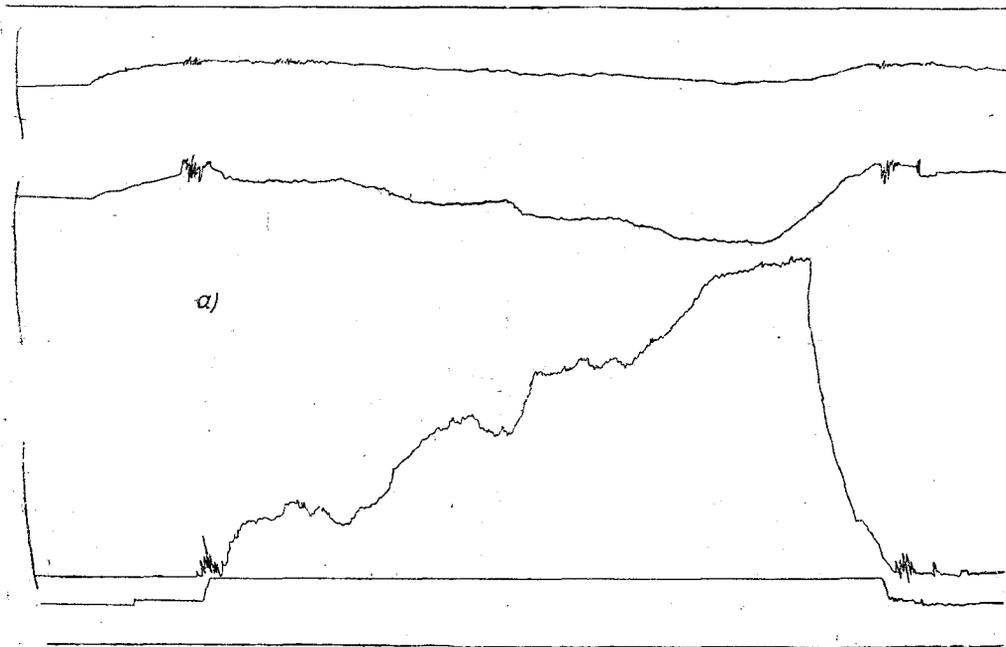


Рис. 2. Подъем № 4, 7/VI 1952 г., 13 час. 16 мин. — 14 час. 04 мин. Прибор № 3925.

женное электромагнитным контактом. Прибор рассчитан на высоту подъема не более 1,5 км.

С прибором была проведена опытная серия полетов.

Вид записи метеорографа дан на рис. 2. Результаты обработки подъемов приведены на рис. 3 и 4.

Полет 8/1 1952 г. был совершен в 11 час. 15 мин. при облачности 10/0 Cs, Ac и ветре 3—6 м/сек. Самолет сделал 5 площадок при подъеме и спуске. Верхняя площадка была на высоте 310—320 м. Для большей наглядности каждая площадка дана в увеличенном масштабе; числа сбоку линий, соединяющих высоты, указывают величины вертикальных скоростей вихря в м/сек. Горизонтальные размеры вихрей получаются порядка 3—6 км, вертикальные скорости — от 53 до 2 см/сек., с наиболее часто повторяющимися значениями 27—40 см/сек. Следует отметить, что полеты совершались над небольшой возвышенностью, высотой в несколько десятков метров. Эта возвышенность, очевидно, и создавала вертикальные смещения воздушного потока. Метод требует очень тщательного управления самолетом, чтобы машина была поставлена в строго горизонтальный неуправляемый полет и не имела тенденции к собственным смещениям по вертикали.

На рис. 2 дана метеорограмма полета 7/VI в 13 час. 16 мин., а на рис. 4 — результаты обработки этого полета. Облачность была 9/3 Ci, Cu, на всех высотах до 1 км наблюдалась сильная болтанка. Самолет в неуправляемом полете делал горизонтальные площадки на высотах 200, 500, 700 и 1000 м. Полет на

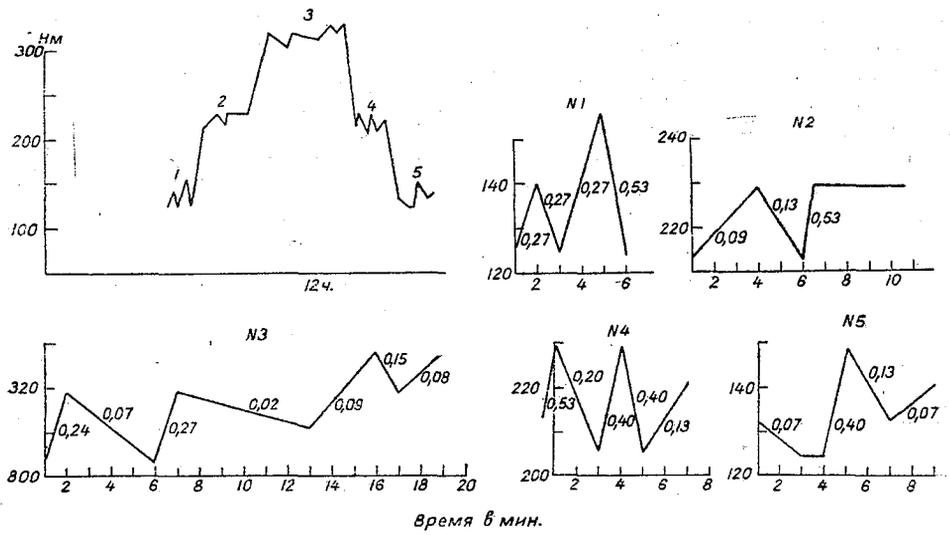


Рис. 3. Обработка подъема метеорографа 8/1 1952 г.

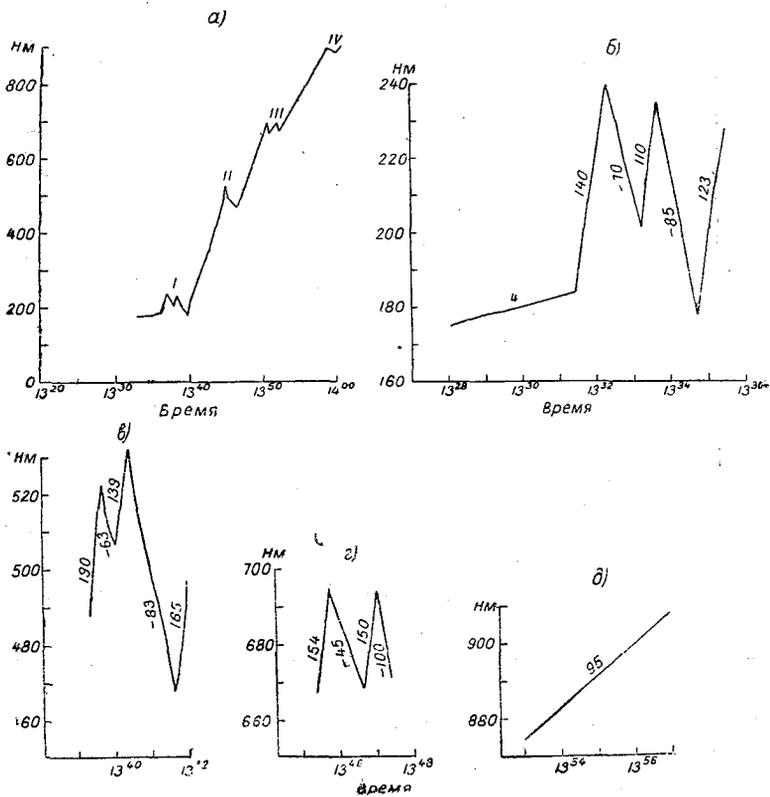


Рис. 4. Обработка подъемов.

а) 7/VI 1952 г., б) высота 200 м, в) высота 500 м, г) высота 700 м, д) высота 900 м.

высоте 1 км происходил под основанием кучевой облачности, и самолетом была зафиксирована вертикальная скорость 95 см/сек. Величины же отдельных вертикальных восходящих скоростей продолжительностью 1—1,5 мин. достигали 150—190 см/сек., а нисходящие были порядка 75—100 см/сек. Полет 7/VI происходил в типичный летний день, с хорошо заметной болтанкой самолета и неустойчивым состоянием атмосферы в нижнем ее слое.

Наконец, самым простым способом исследования структуры потока с помощью самолета являются визуальные наблюдения за болтанкой самолета. Этот метод, несмотря на его субъективность, при тщательном применении может дать весьма интересные качественные характеристики структуры потока. Для улучшения визуальных наблюдений за болтанкой необходимо иметь на приборной доске и в кабине наблюдателя некоторые несложные приборы: акселерометр, вариометр — прибор, определяющий вертикальную скорость подъема или снижения самолета, и секундомер для счета числа порывов. Пользуясь ими, бортаэролог может дополнительно определять число порывов в единицу времени, максимальные и средние размеры бросков самолета, скорости вертикальных смещений самолета.

Уравновешенные шары-пилоты

Уравновешенные шары-пилоты применяются для исследования вертикальных токов в атмосфере и траекторий движения воздушного потока.

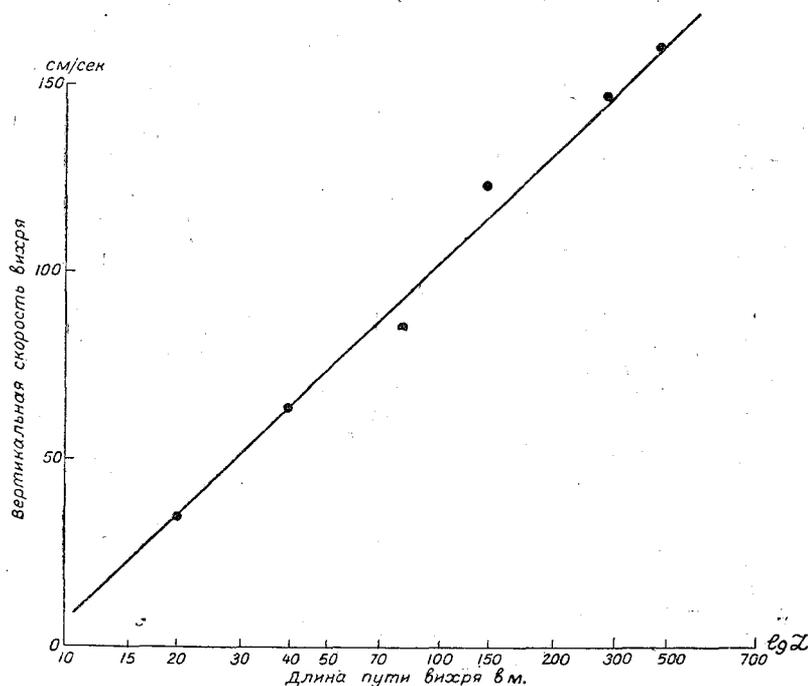


Рис. 5. Зависимость вертикальной скорости вихря от длины его пути.

Этот метод позволяет получить величины вертикальных токов с точностью ± 10 см/сек. и периодом осреднения 15 сек., величины средней скорости ветра, а также величины пульсаций воздушных потоков, размеры которых начинаются от 50—60 см, а при пользовании оболочками № 10 — от 25—30 см.

Правильные результаты получаются только при тщательном уравновешивании шара.

Автором [5, 6] была проведена обработка большого количества наблюдений за уравновешенными шарами-пилотами. Эта обработка показала полную пригод-

ность метода для исследования микроструктуры воздушного потока. Приведем некоторые результаты обработки.

На рис. 5 приведена зависимость между вертикальной скоростью вихря и длиной его пути, взятая в логарифмической шкале. Вихри, имеющие большие скорости вертикальных смещений, имеют различные вертикальные скорости на разных отрезках пути. На рис. 6 приведено распределение вертикальной скорости в см/сек. на различных участках пути вихря. Кривые 1—6 дают восходящие потоки раз-

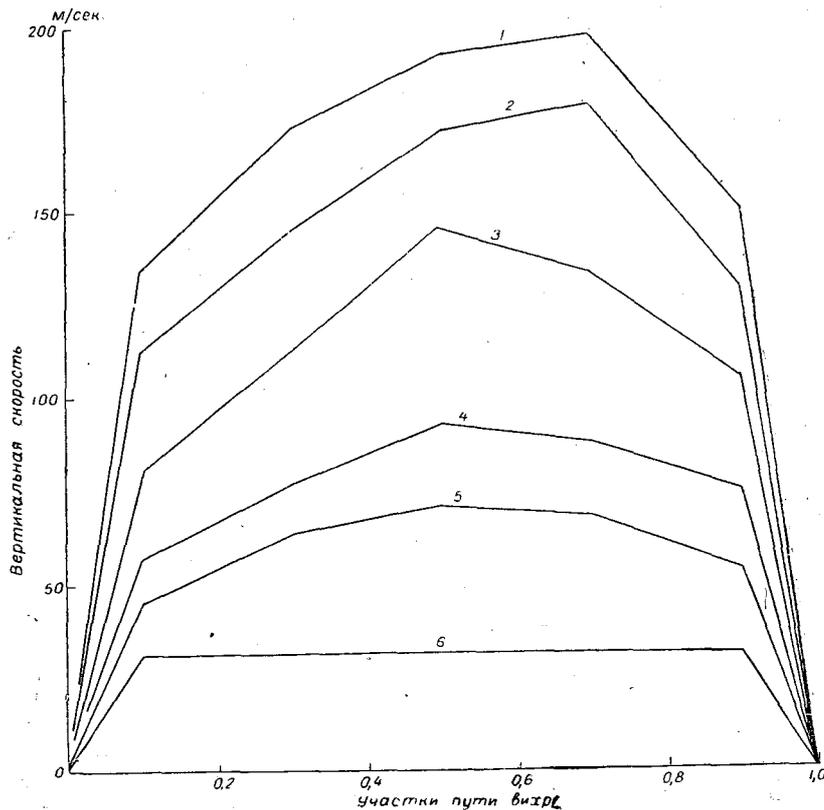


Рис. 6. Распределение вертикальной скорости на различных участках пути вихря. День.
Восходящий поток: 1 — до 200 м, 2 — до 60 м, 3 — до 100 м, 4 — до 200 м, 5 — до 400 м, 6 — до 600 м.

личных величин — от 20 до 600 м. Как видно, вертикальная скорость вихря быстро растет с момента его зарождения, достигает максимума примерно на половине пути, затем медленно падает и только на последнем отрезке пути быстро уменьшается до нуля.

Исследование микроструктуры воздушного потока с помощью прибора, поднимаемого на привязном аэростате

Для систематических исследований микроструктуры воздушного потока на привязных аэростатах была несколько изменена конструкция аналогичного прибора П. А. Молчанова и построен прибор с синхронной регистрацией горизонтальной составляющей порывистости ветра и средней скорости ветра.

В приборе высота подъема определяется с помощью весьма чувствительного приемника давления. В основу приемной части прибора положены хорошо известные в литературе принципы.

Регистрация горизонтальной составляющей порывов ветра проводится по методу П. А. Молчанова [1]. Приемник представляет пропеллер с горизонтальной осью вращения. Лопасты пропеллера укреплены под углом 45° к оси, на которой пропеллер вращается. Причем одна лопасть направлена вверх, а другая — вниз. Под влиянием давления воздушного потока создается момент, который стремится привести пропеллер во вращение. Повороту пропеллера препятствует пружина, один конец которой соединен с осью, а другой прикреплен к корпусу прибора. При повороте пропеллера происходит изменение кривизны пружины. Таким образом, для каждой скорости ветра, набегающего на пропеллер, создается равновесие между давлением ветра на лопасти пропеллера и изгибом пружины. Ось пропеллера соединена с рычагом пера, записывающего изменение скорости ветра на барабане прибора. Подбирая упругость пружины и соотношение рычагов, можно дать любую чувствительность прибору, а также получить линейную зависимость между скоростью ветра и ординатой записи на барабане прибора, тем самым квадратичная зависимость давления ветра от его скорости чисто механическим путем преобразуется почти в линейную шкалу скорости. Пропеллер имеет дополнительную плоскость, нейтрально расположенную к потоку, а следовательно, и не испытывающую давления ветра под каким бы углом она ни установилась. Плоскость служит демпфером при колебаниях пропеллера, вызываемых порывами ветра. Приемник порывистости является весьма чувствительным к малейшим изменениям скорости ветра. Регистрируя горизонтальную составляющую порывов ветра, приемник порывистости одновременно дает и величину средней скорости ветра.

Измерение средней скорости производится трехчашечным анемометром. Ось анемометра вращает улитку. При вращении улитки перо, опирающееся на нее, поднимается пропорционально углу поворота. После полного поворота перо опускается в начальное положение. Таким образом, получается пилообразная запись. Ввиду относительно быстрого вращения барабана, передаточное число оборотов оси анемометра к обороту улитки составляет 1 : 90 или 1 : 120. Величина средней скорости ветра определяется по расстоянию между двумя соседними зигзагами.

Высота подъема прибора вычислялась по записи давления воздуха. Приемниками давления воздуха служили 4—5 анероидных барокоробок, соединенных в столбик. Чувствительность приемника давления составляла около 2 мб на 1 мм ординаты, что давало возможность судить даже о небольших смещениях прибора по вертикали.

Нижнее перо прочерчивало базисную линию. Запись производилась на закопченной бумаге, наклеенной на барабан диаметром 70 мм и высотой 170 мм, вращающийся часовым механизмом. Приборы обычно имели по два часовых механизма: один с оборотом в 18—20 мин. и второй с оборотом в 45 сек.; это давало линейные скорости вращения в 0,22 и 5 мм/сек.

Для часового механизма с оборотом в 45 сек. предусмотрено простое автоматическое включение часов через заранее заданный промежуток времени. Общий вид прибора дан на рис. 7.

Для уменьшения раскачиваний прибора во время подъема сконструирована специальная система подвески прибора к тросу аэростата. Прибор ставился в легкую дюралюминиевую корзинку. Корзинка крепилась в двух точках: в одной — к угольнику и во второй — через замок трубки к тросу аэростата. Вид крепления дан на рис. 8.

Трубка, расположенная снизу корзинки, могла свободно ходить по направляющей, укорачиваясь или удлиняясь, и устанавливала прибор на разных расстояниях от троса в зависимости от угла наклона его. На конце трубки был сделан замок, который надевался на трос, и конец трубки свободно скользил по тросу.

Угольник крепился к тросу в двух точках таким образом, что мог свободно вращаться около троса. Для того чтобы угольник не скользил, он снизу упирался в особый зажим, жестко скрепленный с тросом. Для ориентировки прибора по направлению ветра корзинка снабжена стабилизатором, состоящим из двух пластин.

Система подвески давала возможность располагать прибор всегда почти в горизонтальном положении — при всех наклонах троса, автоматически устанавливала

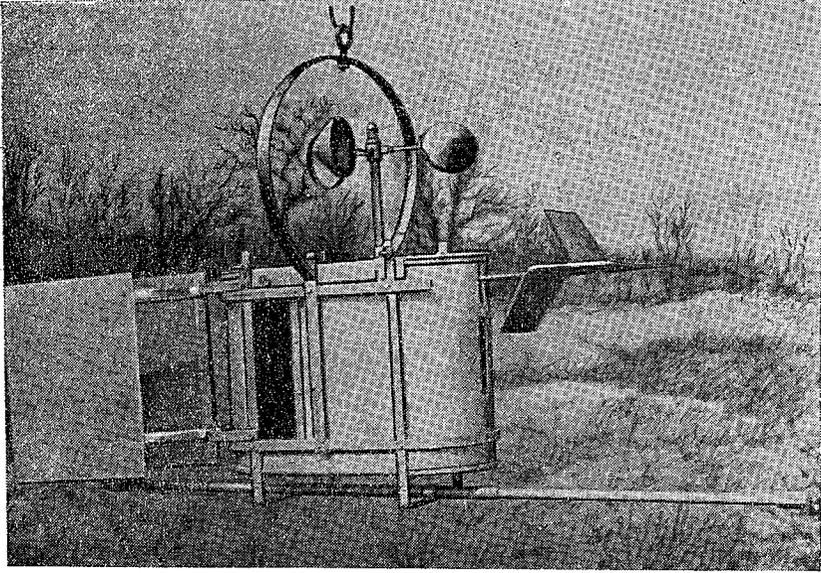


Рис. 7.

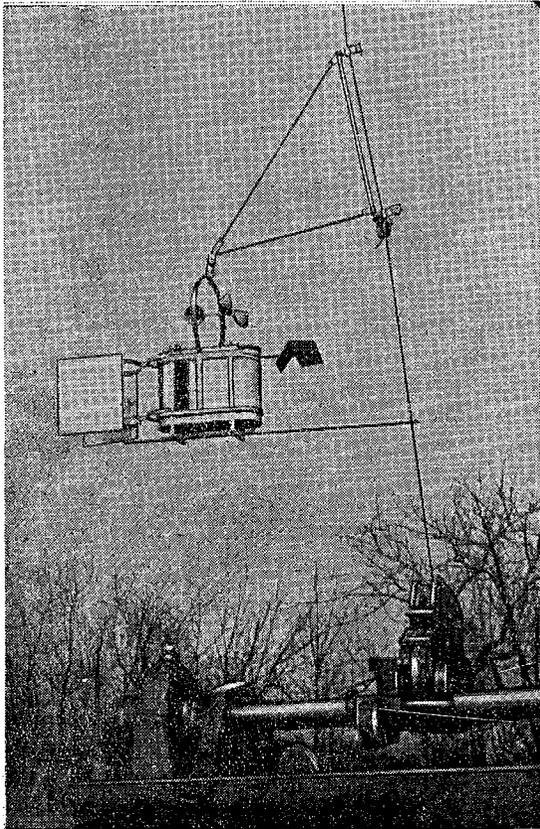


Рис. 8.

прибор в плоскости ветра и сильно уменьшала раскачивание прибора при порывистом ветре.

Тарировка приемников средней скорости и горизонтальной составляющей проводилась в диапазоне скорости от 1 до 15 м/сек. — через каждые 0,4—0,5 м/сек., причем вначале шел подбор чувствительности приемника путем подбора пружин различной жесткости и длины (табл. 1).

Таблица 1

Чувствительность приемника горизонтальной составляющей

№ приборов	Интервал скоростей, м/сек.	Чувствительность, м/сек. на 1 мм ординаты
101	2—12	0,10
102	1,5—7,5	0,10
102	7,5—16	0,15
103	1—12	0,10

Результаты тарировки приемника средней скорости ветра наносились на график, на котором по оси абсцисс откладывалась скорость в м/сек., по оси ординат — ширина между зубцами в миллиметрах. Зная ширину зубцов, легко определяли скорость ветра в м/сек. Тарировка приемника давления воздуха проводилась обычным путем, под колоколом воздушного насоса.

Лабораторные и полевые исследования прибора

В настоящее время для исследования структуры воздушного потока у земной поверхности часто применяют весьма сложную аппаратуру. Использование такого рода приборов для исследований в свободной атмосфере по ряду причин пока еще затруднено. Предложенные нами приборы с механической записью хотя и являются весьма простыми, но не лишены определенных недостатков. Пользование такого рода приборами возможно при условии тщательного проведения всех лабораторных и полевых испытаний прибора, устанавливающих пределы его погрешностей.

Хотя П. А. Молчанов довольно широко применял приемник горизонтальной составляющей порывов ветра при змейковых подъемах, но исследований точности его показаний им проведено не было. Указание на малую инерционность приемника также нигде не подтверждено фактическими данными.

Лабораторные исследования должны выяснить:

а) сохранение постоянства показаний приборов в зависимости от изменения направления потока к прибору или наоборот;

б) инерционность приемника и инструментальную ошибку прибора;

в) взаимное влияние приемников друг на друга.

Полевые испытания должны выяснить:

а) пределы скорости ветра, допускающие исследование прибора;

б) сравнимость показаний двух приборов в воздухе.

а) Определение постоянства показаний приемников. Прибор, подвешенный к тросу, имеет возможность совершать движения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости и отклоняться от направления ветра на некоторый угол.

Для выяснения влияния такого рода колебаний прибора на показания его были проведены тарировки прибора, устанавливаемого под разными углами к направлению потока: для горизонтальных углов в пределах от 0 до 45° и для вертикальных углов в пределах от 0 до ±25°. Результаты этих тарировок нанесены на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что поворот приемника горизонтальной составляющей на углы до 45° к направлению потока в горизонтальной плоскости не сказывается на его показаниях. Изменение вертикальных углов не влияет на показания приемника горизонтальной составляющей в пределах углов ±15°; при отклонении на больший вертикальный угол значительно изменяется чувствительность прибора, так,

например, при углах $\pm 25^\circ$ чувствительность прибора уменьшается до 60% величины чувствительности при 0° .

Приемник средней скорости сохраняет постоянство показаний при вертикальных углах до $\pm 25^\circ$ и начинает работать с 1,5 м/сек.

б) Определение инерции прибора и инструментальной ошибки.

Инерционность прибора можно характеризовать постоянной времени M . Постоянная времени определяется как время установления режима работы при скачкообразном изменении условий работы.

Для определения M использовался прибор с оборотом барабана за 45 сек. Прибор помещался в аэродинамическую трубу, устанавливалась определенная скорость потока, включался часовой механизм и на ленте прочерчивалась горизонтальная прямая 1, соответствующая данной скорости (рис. 10).

При помощи длинного, тонкого стержня приемник отклонялся на некоторый угол так, чтобы перо писало площадку 2 выше или ниже начальной. Затем стержень быстро отнимался и перо снова возвращалось на уровень первоначальной площадки. Зная кривизну начальной дуги и проводя этим радиусом дуги через точки a и b , определяют постоянную времени M по расстоянию ab (в миллиметрах) и по известной скорости вращения барабана 0,204 мм/сек. Таким образом исследование приемников горизонтальной составляющей скорости ветра при различных значениях потока от 2 до 8 м/сек. Результаты измерений даны в табл. 2.

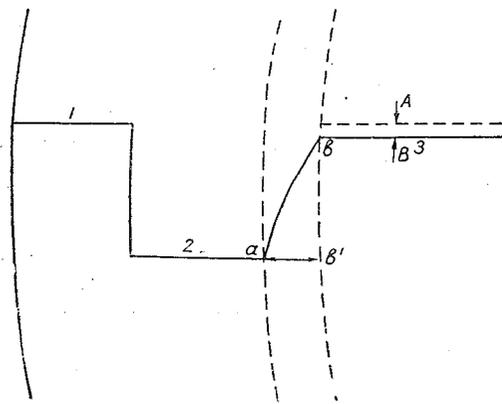


Рис. 10. Схема определения инерции.

Было измерено невозвращение пера при разных скоростях потока и подсчитаны среднеквадратичные отклонения от начального положения. Результаты измерений даны в табл. 2. Величина инструментальной ошибки не зависит от скорости потока и составляет 2,0 мм, что соответствует скорости 0,12 м/сек.

Полученные величины инерции приемника горизонтальной составляющей скорости ветра в общем указывают на весьма хорошие качества приемника. Величина постоянной времени M для $v = 3$ м/сек. составляет 0,30 сек., для $v = 6$ м/сек. — 0,10 сек., а для $v = 8$ м/сек. — 0,08 сек.

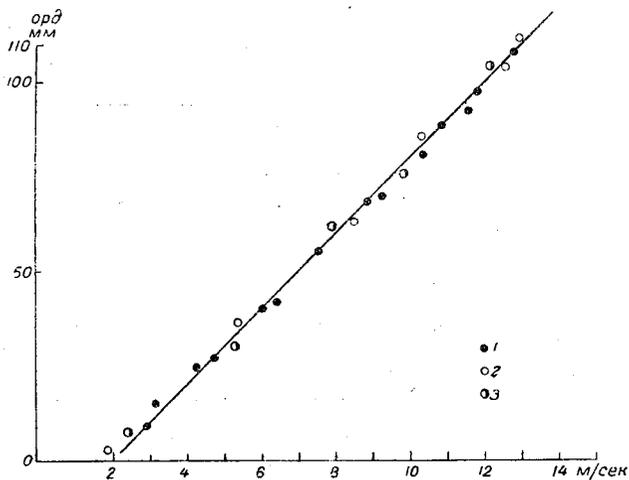


Рис. 9. Влияние горизонтальных углов. Прибор № 103.
1 — начальная тарировка, 2 — 10° , 3 — 25° .

Одновременно по этим записям определилась и инструментальная ошибка прибора, вызванная трением и люфтом в осях передачи. Ошибка эта выражается в том, что выведенное из первоначального положения перо не возвращается на тот же уровень — разность в ординатах составляет AB на рис. 10.

Было измерено невозвращение пера при разных скоростях потока и подсчитаны среднеквадратичные отклонения от начального положения. Результаты измерений даны в табл. 2. Величина инструментальной ошибки не зависит от скорости потока и составляет 2,0 мм, что соответствует скорости 0,12 м/сек.

Масштаб осреднения пульсационного поля λ составляет всего 75 см. В сложных наземных установках, применяемых А. М. Обуховым [7], величина $M = 0,015$ сек. и $\lambda = 5$ см.

Таблица 2

Величины инерции и инструментальной ошибки приемника горизонтальной составляющей

Скорость потока, м/сек.	Инерция		Инструментальная ошибка	
	M сек.	λ м	Среднеквадратичные значения отклонения пера прибора	
			мм	м/сек.
2,30	0,320	0,72	1,93	0,116
3,70	0,289	1,07	1,77	0,106
4,00	0,214	0,82	3,22	0,193
6,64	0,095	0,63	1,45	0,087
7,50	0,092	0,69	2,04	0,121
7,85	0,087	0,68	1,66	0,100

Среднеквадратичная величина инструментальной ошибки составляет для приемника горизонтальной составляющей около 2 мм или 0,12 м/сек. При многократных поверках этого приемника наблюдается некоторый разброс точек около начальной кривой, — они не все ложатся строго на одну линию. Этот разброс также определяет величину инструментальной ошибки приемника. Величина средних максимальных отклонений нескольких поверок составляет $\pm 0,2$ м/сек. Таким образом, инструментальную ошибку приемника горизонтальной составляющей примем как среднемаксимальную в $\pm 0,20$ м/сек. и среднеквадратичную в $\pm 0,1$ м/сек.

Значения скоростей ветра, с которых начинает работать приемник горизонтальной составляющей, оказались равными 2,0—2,5 м/сек.

в) Взаимное влияние приемников прибора. Прибор имеет относительно небольшие размеры, и разместить все приемники таким образом, чтобы они не оказывали влияния один на другой, было невозможно. В наиболее выгодном положении находится приемник горизонтальной составляющей скорости ветра, вынесенный несколько вперед и находящийся в невозмущенном потоке. Приемник средней скорости ветра уже должен испытывать влияние находящегося впереди пропеллера горизонтальной составляющей.

Тарировка приемника средней скорости делалась одновременно с тарировкой приемника горизонтальной составляющей порывов, поэтому частично это влияние уже учитывалось при тарировке. Ниже приведены результаты продувки приемника средней скорости при различных положениях пропеллера.

Продувка приемника горизонтальной составляющей скорости ветра показывает, что его чувствительность останется неизменной при изменении угла в пределах 45° .

Результаты тарировки приемника средней скорости ветра показали, что при расположениях пропеллера горизонтально и вертикально наблюдается небольшая разница для скорости до 3,5 м/сек., а затем показания приемника средней скорости практически становятся одинаковыми. Пропеллер, поставленный вертикально, частично экранирует приемник средней скорости и уменьшает его показания на 0,2—0,3 м/сек. при скоростях потока до 2 м/сек.; при большей скорости ветра этот эффект не наблюдается.

Предварительные полевые испытания прибора

Полевые испытания прибора проводились на посту аэростатного зондирования в Воейково. Одновременно с разработкой методики исследования шло дальнейшее изучение качества работы прибора.

Аэростат иногда менял свою высоту в момент работы прибора, и приемник в этом случае показывал вертикальные смещения. Для учета собственных колебаний высоты аэростата был использован приемник давления воздуха повышенной чувствительности. Это дало возможность определять колебания высоты прибора с точностью до 2—3 м; записи при меняющейся высоте прибора из обработки выбрасывались. В целях помещения прибора в воздушном потоке, не возмущенном аэростатом, его приходилось крепить ниже аэростата на 50—70 м, чем также достигалось уменьшение вертикальных колебаний прибора. Для того чтобы прибор устанавливался всегда горизонтально, пришлось несколько изменить систему подвески прибора, уменьшив трение в направляющей трубке, придав ей форму дуги.

Записи приемника горизонтальной составляющей получались, как правило, четкие. Большие размеры барабана позволяли применять большие чувствительности приемника. Приборы подготавливались для работы в комплексной экспедиции ГГО в Пахта-Арале, где наблюдаются сравнительно небольшие скорости ветра, поэтому применялись приборы с повышенной чувствительностью и регистрацией порывов ветра до 12—15 м/сек.

Одновременные подъемы двух приборов (№ 101 и 103) с измерениями средних скоростей ветра приемниками горизонтальных порывов при слабой порывистости были проведены в период с 15 по 28/IV. Результаты сравнения показаний этих приборов даны на рис. 11. Следует отметить, что приборы последовательно поднимались на стандартные высоты и регистрировали скорости ветра с разницей во времени 5—10 мин. Расхождения в показаниях двух приборов, смещенных во времени на 5—10 мин., колеблются в пределах 1 м/сек.

Для того чтобы перо порывистости ветра при сильных порывах не выходило за пределы барабана, были поставлены ограничители. Верхний предел регистрации порывов ветра в данных приборах 15—16 м/сек.

Методика наблюдений

Для проверки работы приборов, разработки методики подъемов и сбора материала по структуре пульсаций был проведен ряд наблюдений в слое от земли до 300—400 м.

Во время работы Пахта-Аральской экспедиции ГГО проведена серия подъемов приборов с регистрацией порывистости ветра. Подъемы аэростатного метеорографа и прибора с регистрацией порывистости ветра проводились последовательно через 2-часовые промежутки времени. Обычно подъем аэростатного метеорографа до высоты 400—500 м занимал 1 час. 15 мин. — 1 час. 20 мин., затем производился подъем прибора для регистрации порывистости ветра в течение 18—20 мин. Таким образом, за каждый 2-часовой промежуток мы имели распределение основных метеорологических элементов по высотам и характер структуры ветра. В течение 18—20 мин. работы прибора порывистости регистрация велась на уровне 3 м 1 мин., а на высотах 100, 200, 300 и иногда 400 м — по 3—4 мин. Часовой механизм

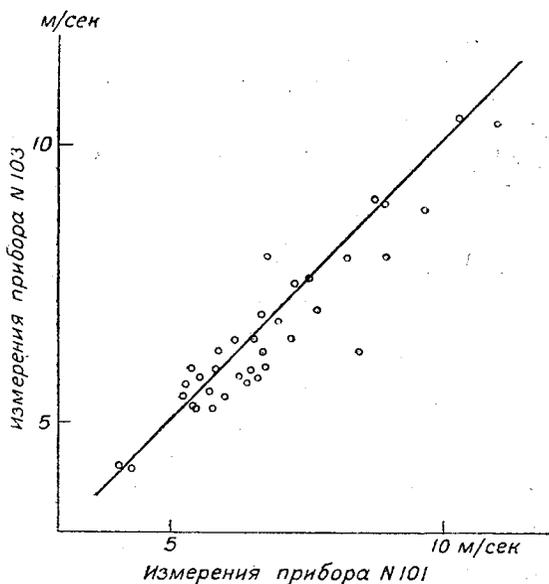


Рис. 11. Сравнение показаний двух приборов.

прибора имел ограничитель, и после полного оборота барабана часы автоматически останавливались. Как показал опыт, для получения характеристик микроструктуры воздушного потока минимальная продолжительность регистрации на одном уровне должна быть не менее 2,5—3 мин.

Некоторые результаты обработки лент с записью порывистости ветра приведены в отдельной работе автора, помещенной в данном сборнике.

Выводы о применимости прибора и ошибках измерений

Приборы с регистрацией горизонтальной составляющей порывистости ветра дают возможность получить величины горизонтальных пульсаций, средние скорости ветра, периоды пульсаций. По этим данным могут быть вычислены дополнительно горизонтальные размеры вихрей, величины фактора порывистости и др.

Приемник горизонтальной составляющей порывистости ветра сохраняет постоянство показаний при отклонениях горизонтальных углов на $\pm 45^\circ$ и вертикальных углов на $\pm 15^\circ$, имеет начальную чувствительность 2—2,5 м/сек., выше начальной скорости фиксирует всякие изменения скорости ветра от 0,1 м/сек.; инерция приемника составляет 0,1—0,2 сек., инструментальная ошибка равна 0,10—0,15 м/сек.; собственных колебаний приемник не имеет. Измерения надежны при отсутствии вертикальных смещений прибора.

На основании лабораторных и полевых исследований, а также большого количества измерений прибор для регистрации горизонтальной составляющей порывистости ветра можно использовать на сети пунктов аэростатного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов П. А. Аэрология. Гидрометеиздат, 1938.
2. Пинус Н. З. К вопросу об экспериментальном исследовании порывистости воздушных потоков в свободной атмосфере. Метеорология и гидрология, 1946, № 4.
3. Дубов А. С. Определение скорости вертикальных порывов ветра при самолетных подъемах с помощью акселерографа. Труды ГГО, вып. 16, 1949.
4. Калиновский А. Б. и Пинус Н. З. Аэрология. Гидрометеиздат, 1951.
5. Воронцов П. А. Опыт исследования воздушных потоков над лесными полосами и межполосными клетками в Каменной Степи. Труды ГГО, вып. 32, 1952.
6. Воронцов П. А. Точность метода уравновешенных шаров-пилотов. Труды ГГО, вып. 32, 1952.
7. Обухов А. М. Характеристики микроструктуры ветра в приземном слое атмосферы. Изв. АН СССР, серия географ., № 3, 1951.

АЭРОСТАТНЫЙ МЕТЕОРОГРАФ

Микроаэрологические исследования нижнего слоя атмосферы до последнего времени почти не проводились из-за отсутствия необходимых приборов и детально разработанных методов. Между тем при решении целого ряда научных и практических задач знание распределения основных метеорологических элементов в слое до 500—700 м является совершенно необходимым.

В данной работе дается описание модернизированного в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова метеорографа системы П. А. Молчанова и приводится методика исследования таких метеорологических элементов, как давление, температура и влажность воздуха, скорость и структура ветра (средняя скорость и порывистость).

Модернизация прибора проводилась в отделе аэрологических исследований под руководством П. А. Воронцова, при участии С. И. Соколова, Н. Г. Филатова и С. И. Маслова.

Модернизированный аэростатный метеорограф принципиально ничем не отличается от широко известного змеякового метеорографа системы П. А. Молчанова, он только конструктивно изменен в зависимости от тех специфических условий, в которых ему предстояло работать.

На рис. 1 дан внутренний вид прибора. Первое перо снизу неподвижное, для проведения нулевой линии. Второе перо связано с приемником давления и смещается вверх при понижении атмосферного давления. Приемник давления состоит из 5 anerоидных коробок, установленных в виде столбика и укрепленных на нижней плите прибора.

Третье перо снизу записывает относительную влажность воздуха. Приемник влажности — пучок волос, один конец которого укреплен неподвижно, другой через шкивок соединен с рычагом, передающим изменение длины волоса перу.

Четвертое перо снизу записывает температуру воздуха. Приемником температуры является биметаллическая пластинка следующих размеров: нижнее основание — 295 мм, верхнее — 19,0 мм, длина — 95,0 мм.

Второе перо сверху записывает порывистость ветра. Приемник порывистости ветра, построенный по принципу, разработанному П. А. Молчановым, состоит из двух, симметрично расположенных на оси лопастей, в виде пропеллера. От свободного вращения под давлением ветра лопасти удерживаются плоской пружиной,

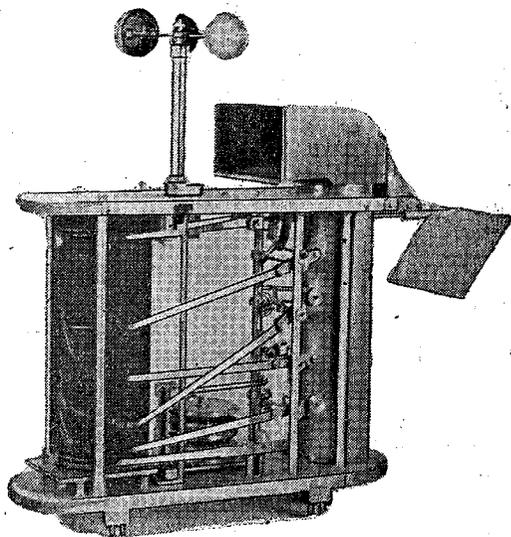


Рис. 1.

упирающейся в стопорное приспособление, и при порывах ветра лишь поворачиваются на определенный угол, зависящий от скорости ветра и сопротивления пружины. При порывах ветра перо прочерчивает дугообразные штрихи, длина которых пропорциональна величине скорости ветра. При порывах средняя линия записи порывистости может дать среднюю скорость ветра, а частота штрихов — период порывов. Приемник начинает работать со скорости 2—2,5 м/сек.

Первое перо сверху записывает среднюю скорость ветра. Приемником средней скорости ветра служит вертушка с тремя полушариями. Ось полушарий червячной передачей соединена с осью эксцентрика, на который опирается перо. При вращении вертушки перо прочерчивает пилообразную кривую. Средняя скорость ветра определяется по расстоянию между зубцами. Полушария начинают вращаться при скоростях воздушного потока 1,4—1,5 м/сек.

Смещение всех перьев происходит в вертикальной плоскости. Перья укреплены на осях, концы которых хорошо закалены и сведены на конус. Оси упираются в стальные закаленные цапфы. Вся система приемник — перо сбалансирована и на осях поставлены пружины для уменьшения мертвого хода. Перья имеют прижимные винты, регулирующие степень их прижатия к барабану. Перестановка перьев в начальное положение, в зависимости от изменения значений метеорологических элементов, производится поворотом их на осях, с предварительным освобождением прижимных винтов.

Приемники температуры и влажности помещены в шахту диаметром 66 мм. Для увеличения вентиляции внутри шахты, сверху на шахту одевается специальный раструб, выходное отверстие которого направлено по ветру, снизу шахты установлена чашечка, обращенная отверстием к направлению потока. Как показала продувка, скорость потока воздуха в шахте больше, чем скорость ветра, на 8%. При слабых скоростях ветра на шахту вместо раструба одевается вентилятор с электромоторчиком для искусственной вентиляции шахты. При напряжении в 12 вольт вентилятор создает в шахте поток скоростью в 6 м/сек.

Запись изменения метеорологических элементов производится на закопченной бумаге, одеваемой на барабан. Барабан имеет высоту 166—170 мм и диаметр 70 мм и вращается часовым механизмом. Время одного оборота барабана может устанавливаться на 2—4—6 час. Для отведения перьев от барабана имеется арретир, который связан с пусковым механизмом часов. Одновременно с опусканием перьев на барабан пускаются в ход и часы, при отведении перьев часы останавливаются и барабан перестает вращаться. Барабан вместе с часовым механизмом выдвигается на особых салазках и полностью удаляется от прибора, благодаря чему избегается смазывание кофты на ленте при ее смене. Прибор помещается в металлический кожух, одеваемый обычно снизу. Между стенками шахты и кожухом имеется свободное пространство в 8—10 мм, для защиты приемников от нагревания лучами солнца. В кожухе имеется два небольших щелевидных отверстия: спереди — в нижней части его и сзади — в верхней части, для свободной циркуляции воздуха внутри прибора и лучшей его вентиляции. Сбоку, против перьев, в кожухе сделано окошечко, закрытое светлым целлулоидом. Кожух скрепляется с прибором при помощи винтов.

Внешний вид прибора дан на рис. 2. Прибор помещается в легкую алюминиевую корзинку. В задней части корзинки сделана флюгарка в виде двух плоскостей размером 135×200 мм, которая служит для ориентировки прибора по направлению ветра. Флюгарка жестко соединена с корзинкой. Внизу корзинки прикреплена трубка со стержнем. Стержень свободно перемещается в трубке. На конце стержня имеется шайба, не дающая стержню выходить из трубки. На другом конце стержня укреплен особой конструкции замок, при помощи которого корзинка с прибором крепится к тросу аэростата. Сверху корзинки имеется дужка с кольцом. Для крепления корзинки с прибором к тросу служит специальная складная рамка в виде треугольника. Две вершины рамки крепятся при помощи хомутиков к тросу, а третья — к дужке корзинки с прибором. Для того чтобы рамка не смещалась вниз, она упирается в специальный зажим, плотно закрепляемый на тросе. Таким образом, рамка вместе с корзинкой свободно вращается вокруг троса аэростата

и при помощи стабилизаторов флюгарки располагается по ветру. При помощи нижнего стержня прибор под влиянием собственного веса автоматически устанавливается вертикально. Для уменьшения раскачиваний прибора в вертикальной плоскости, в задней части на стержень одета металлическая спиральная пружина, которая амортизирует отдельные броски прибора. Такая система подвески позволяет получить устойчивое положение прибора в воздухе, сведя до минимума его раскачивание под влиянием порывов ветра, и дает возможность располагать любое количество приборов на тросе на любых расстояниях.

Для уменьшения нагревания прибора лучами солнца, с боков прибора, на корзинке, укрепляются боковые защиты. Защиты сделаны из легкого картона и уста-

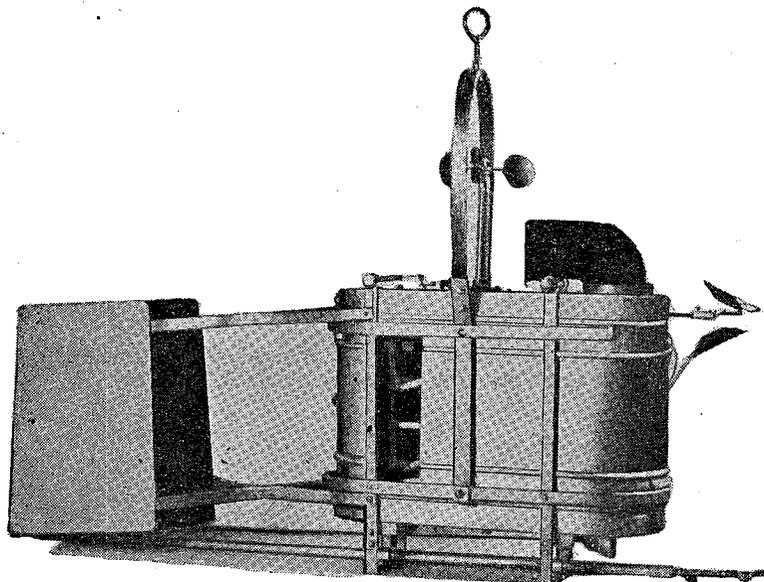


Рис. 2.

навливаются так, что между кожухом прибора и защитой получается расстояние около 1 см, в котором свободно циркулирует воздух. Боковые защиты укрепляются к корзинке вместе с приборами специальными шпильками.

Прибор имеет следующие размеры: высота 33,6 см, длина 33,0 см, ширина 10,8 см. Размеры прибора с корзинкой: длина 73,0 см, высота 50,0 см, ширина с боковыми защитами 14,3 см. Вес прибора максимальный 2385 г, вес прибора с корзинкой 3410 г. Вес рамки для крепления прибора 472 г. Следовательно, общий вес прибора с рамкой и корзинкой составляет 3882 г.

Лабораторные испытания аэростатного метеорографа

Поскольку прибор предназначен для производства весьма тонких микро-аэрологических исследований, необходимо было произвести весьма тщательные лабораторные и полевые испытания прибора с целью определения пределов его погрешности и расчета возможной точности измерения отдельных метеорологических элементов. Лабораторные исследования проводились под руководством П. А. Воронцова младшим научным сотрудником В. И. Селицкой и студентами Ленинградского государственного университета И. С. Ермаковой и И. Г. Ермолаевой в порядке выполнения дипломных работ.

Инерция термодатчика

В результате исследований была выбрана термопластинка, обладающая наибольшей чувствительностью, и подобрано такое ее расположение в шахте; при котором получаются минимальные значения коэффициента инерции термодатчика $\lambda = 0,26$ мин.

при скорости потока 4,5 м/сек. Далее определялся коэффициент термической инерции прибора в целом. Результаты исследований даны в табл. 1.

Таблица 1

Термическая инерция прибора № 8						
Нагревание в термостате, искусственная вентиляция						
v м/сек. . .	0,0	1,7	3,0	4,3	6,5	
λ мин. . . .	5,81	3,64	2,43	1,88	1,53	
Нагревание в термостате, вентиляция в трубе						
v м/сек. . .	0,0	1,55	2,70	2,82	2,98	4,44
λ мин. . . .	5,81	2,34	1,91	1,03	0,82	0,59

При обтекании прибора потоком воздуха скоростью 3 м/сек. коэффициент инерции равен 0,8 мин. В табл. 2 приведены величины расхождения показаний прибора и истинной температуры среды через определенные интервалы времени для скорости ветра 3,5 м/сек., причем за первоначальное значение расхождения взят 1°.

Таблица 2

Величины расхождения показаний прибора и истинной температуры при скорости ветра 3,5 м/сек.						
Время, мин.	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0
Расхождение показаний прибора и истинной температуры, град.	1	0,37	0,14	0,05	0,02	0,007
Расхождение, %	100	37	14	5	2	0,7

Из таблицы видно, что при скорости ветра 3,5 м/сек. прибор через 4 мин. фактически показывает истинную температуру окружающей среды. Следовательно, при скоростях ветра, больших 3 м/сек., 5-минутная выдержка прибора на площадках во время подъема вполне достаточна для того, чтобы прибор показал истинную температуру воздуха. Влияние массы прибора на величину коэффициента инерции определялось при помощи нагревания прибора в термостате, при отсутствии вентиляции получалась величина $\lambda = 5,81$ мин. Затем при помощи спирали и при тех же условиях нагревался не весь прибор, а только одна термопластинка, и $\lambda = 4,57$ мин.; при скорости вентиляции в 3,0 м/сек. и при нагревании в термостате $\lambda = 0,8$, при нагревании спиралью $\lambda = 0,6$ мин. Эти различия, очевидно, вызваны тем, что в термостате нагревался весь прибор, а так как масса его значительна, то при охлаждении корпус прибора отдает часть своего тепла пластинке путем излучения.

В случае штилевой погоды шахта прибора вентилируется при помощи вентилятора, вращаемого электромоторчиком. Поэтому был определен коэффициент термической инерции прибора в зависимости от скорости вентиляции. Для этого прибор нагревался в термостате. После того как прибор нагрелся до определенной температуры, он вынимался из термостата и включался вентилятор. На метеорограмме прочерчивалась кривая спада температур, по которой определялся коэффициент инерции. Например, при скорости потока в шахте 3 м/сек. величина $\lambda = 2,5$ мин., при скорости вентиляции 6 м/сек. $\lambda = 1,55$ мин.

Из табл. 3 видно, что при скорости потока в шахте 6 м/сек. необходима выдержка прибора на площадке во время подъема порядка 8 мин., чтобы прибор показывал истинную температуру. При 5-минутной выдержке ошибка в определении истинной температуры будет составлять примерно 5%.

Для выяснения влияния кожуха прибора на величину коэффициента инерции термоприемника была определена величина λ прибора как с кожухом, так и без

Таблица 3

Величины расхождения показаний прибора и истинной температуры воздуха в зависимости от времени выдержки прибора при искусственной вентиляции шахты $v = 6$ м/сек.

Время выдержки, мин	0	1,55	3,10	4,65	6,20	7,75
Расхождение показаний прибора и истинной температуры воздуха, град.	1	0,37	0,14	0,05	0,02	0,007
Расхождение, %	100	37	14	5	2	0,7

Кожуха при штите. Получены следующие значения коэффициента инерции λ :

Прибор без шахты	5,81 мин.
Прибор с шахтой	8,54 "
Прибор в кожухе	8,62 "

Отсюда следует, что влияние кожуха прибора незначительно и может не учитываться при расчетах времени выдержки прибора на площадках.

Парусность термопластинки

В приборах поставлена сравнительно тонкая биметаллическая пластинка большой площади. Поэтому необходимо было выяснить, не влияет ли скорость ветра на величину отклонения пластинки потоком. Исследования производились в большой аэродинамической трубе Центрального бюро поверки при скоростях от 4 до 14 м/сек. Как показали измерения, скорость потока в шахте до 15 м/сек. не сказывается на показаниях термоприемника прибора.

Определение скорости потока внутри шахты

В связи с решением вопроса об инерции термоприемника была определена скорость потока внутри шахты метеорографа при различных скоростях воздушного потока в аэродинамической трубе (табл. 4).

Таблица 4

Скорость потока воздуха в шахте прибора

Скорость потока в аэродинамической трубе, м/сек.	1,80	2,74	4,15	5,18	6,22	7,20	8,43	9,80
Скорость потока в шахте, м/сек.	1,95	2,96	4,50	5,60	6,74	7,84	9,10	10,6

Из приведенных данных видно, что скорость потока в шахте прибора прямо пропорциональны скорости воздушного потока в трубе с увеличением на 8%. Следовательно, раструб и чашечка, навинченные на шахту, увеличивают вентиляцию последней на 8% по сравнению со скоростью потока в трубе. При подъемах со слабыми скоростями ветра необходимо применять искусственную вентиляцию приемников. Поток в шахте может создаваться вентилятором, вращаемым электромоторчиком. Был установлен малогабаритный моторчик на 14 вольт, который начинает вращаться уже при 4 вольтах (табл. 5).

Таблица 5

Скорость потока в шахте при разных величинах подаваемого напряжения

Напряжение, вольты	4,0	6,5	7,5	10,0	12
Скорость потока в шахте, м/сек.	1,66	3,10	3,63	5,13	6,32

Следовательно, напряжение в 8—9 вольт вполне достаточно для того, чтобы вентилятор создал необходимую скорость потока в шахте.

Измерение скорости потока в шахте производилось при помощи микроанометра, насадка которого устанавливалась примерно на уровне конца термоприемника в центре шахты.

Влияние добавочной защиты на радиационную ошибку прибора

Для уменьшения влияния радиационной ошибки прибор имеет добавочную защиту. Для выяснения роли добавочной защиты прибор нагревался лампой 500 ватт с рефлектором. Лампа ставилась на расстоянии 14,5 см. Под действием света прибор выдерживался 30 мин. Затем лампа убиралась и прибор выдерживался при комнатной температуре. Полученные значения ординат и времени нанесены на рис. 3. Из графика видно, что для прибора без защиты через 18 мин. ордината записи кривой температуры повысилась на 6 мм, а для прибора с защитой — на 3,6 мм. Для прибора с защитой и при вентиляции со скоростью 4 м/сек.

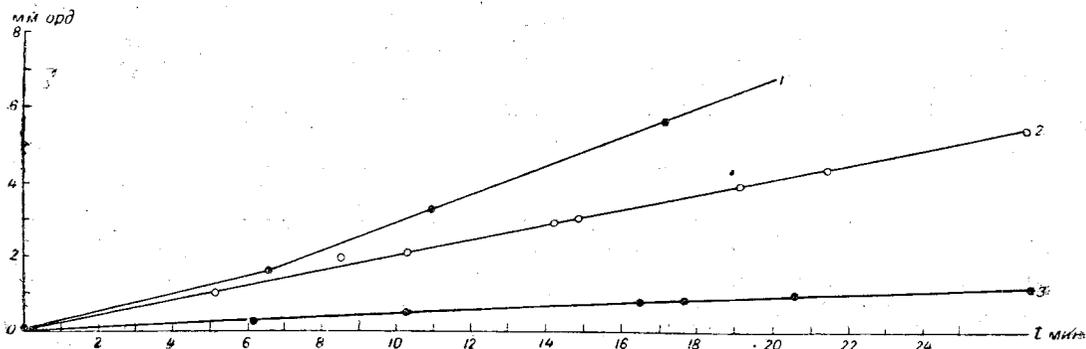


Рис. 3.

1 — без защиты, 2 — с защитой, 3 — с защитой и вентиляцией.

ордината повысилась всего на 0,8 мм, соответственно в градусах нагрев прибора без защиты был около $1,8^\circ$, с защитой $1,0^\circ$ и с защитой и вентиляцией всего $0,2^\circ$. Применение защиты, следовательно, значительно уменьшает радиационный нагрев прибора.

Определение коэффициента инерции приемника влажности

Коэффициент инерции волоса определялся опытным путем для перехода из сухого воздуха во влажный и обратно. Часть опытов проводилась при перепаде влажности от 30 до 100%, часть же опытов имела перепад всего на 30—40%. Прибор при опытах не вентилировался. Коэффициент инерции волоса вычислялся по формуле

$$\lambda = \frac{\tau^{\frac{1}{2}}}{\ln \frac{\Delta u_0}{\Delta u_\tau}},$$

где λ — коэффициент инерции волоса, τ — время в минутах, Δu_0 — разность между влажностью, показанной метеорографом, и фактической влажностью в начальный момент, Δu_τ — разность между влажностью, показанной метеорографом в момент τ , и фактической влажностью.

Коэффициент инерции вычислялся графически. По оси абсцисс откладывалось время в минутах, по оси ординат $\lg \frac{\Delta u_0}{\Delta u_\tau}$. Коэффициент инерции тогда можно вычислить по формуле

$$\lambda = \lg e \operatorname{ctg} \gamma,$$

где γ — угол наклона прямой на графике, e — основание натурального логарифма.

Осредненные данные для интервалов 50—100% и 30—50% даны в табл. 6.

Из таблицы видно, что при росте влажности в интервале от 50 до 100% коэффициент инерции волоса $\lambda = 1,30$ мин. и при уменьшении влажности от 100 до 50% величина $\lambda = 1,75$ мин. При росте влажности в интервале от 30 до 50% $\lambda = 3,25$ мин., а при уменьшении влажности в том же интервале 50—30% величина $\lambda = 6,22$ мин.

В табл. 7 приведено время в минутах, соответствующее расхождению показаний прибора и истинной влажности, для разных значений λ . За первоначальное расхождение взят 1% влажности.

В интервале влажности от 100 до 50% ошибка при 5-минутных площадках равна при уменьшении влажности 5%, при увеличении влажности — 2%. Особенно велика ошибка при малых значениях влажности. В пределах 30—50% ошибка в конце 5-минутной площадки при росте влажности равна 27%, а при уменьшении доходит до 47%. Основным недостатком этих исследований было отсутствие вентиляции при определении инерции волоса. Хотя величина инерции волоса, как известно, мало меняется с изменением скорости потока обтекающего волос, но какое-то минимальное перемещение воздуха около волоса должно наблюдаться. При застойном, невентилируемом потоке инерция возрастает, поэтому приведенные в табл. 6 и 7 величины несколько завышены.

Таблица 6

Значения коэффициента инерции приемника влажности (мин.)

Перепад влажности, %	Интервал влажности, %			
	50—100	100—50	30—50	50—30
38—100	1,02	1,32	3,25	5,30
	1,17	1,81	4,72	4,64
38—90	1,43	2,06	3,72	7,80
	1,46	2,24	4,30	7,16
42—76	1,34	1,76	—	—
43—62	1,42	1,74	—	—
Среднее . .	1,30	1,75	3,25	6,22

Таблица 7

Расхождение показаний, %	λ мин.			
	1,30	1,75	3,25	6,22
1	0	0	0	0
0,37	1,30	1,75	3,25	6,22
0,14	2,60	3,50	6,50	12,44
0,05	3,90	5,25	9,75	18,66
0,02	5,20	7,00	13,00	24,88
0,007	6,50	8,75	16,25	31,10

Исследование приемников ветра

В данном сборнике помещена работа П. А. Воронцова „Методика и аппаратура аэрологических исследований микроструктуры ветра“, в которой даны результаты детальных исследований приемников порывистости ветра, поэтому здесь приведем только краткие выводы.

Приемник порывистости ветра сохраняет постоянство показаний при смещениях в горизонтальной плоскости до $\pm 45^\circ$ и в вертикальной плоскости до $\pm 15^\circ$. Смещение приемника порывистости на большие вертикальные углы уже значительно изменяет чувствительность приемника, так, например, при углах наклона приемника $\pm 25^\circ$ его чувствительность уменьшается до 60% от величины чувствительности при наклоне в 0° .

Приемник средней скорости сохраняет постоянство при вертикальных углах до $\pm 25^\circ$ и начинает работать при ветре скоростью 1,5 м/сек.

Инерция приемника порывистости ветра составляет в среднем около 0,2 сек., т. е. при скачкообразном изменении режима потока приемник через 0,2 сек. показывает уже новый режим. Инерция уменьшается с увеличением скорости потока, составляя при 2,3 м/сек. 0,32 сек., а при скорости 7,8 м/сек. 0,087 сек. При времени оборота барабана в 2 часа инерция приемника даже в 0,3 сек. не скажется на точности измерений. Инструментальная ошибка, вызванная трением и люфтами

в осях и передачах, составляет, например, для прибора № 8 около 2 мм или 0,12 м/сек.

Прибор имеет относительно небольшие размеры, и разместить приемники ветра таким образом, чтобы они не оказывали влияния один на другой и сами не испытывали влияния корпуса прибора, было невозможно. Поэтому поверку приемника средней скорости ветра приходится делать при двух условиях: с установленной над шахтой выходной насадкой и с вентилятором. Как показывают исследования, эти две поверки нужно делать самостоятельно. Учесть влияние корпуса прибора на приемники ветра не представляется возможным, и поэтому тарировку прибора на ветер необходимо делать с полностью подготовленным прибором.

Поверка метеорографов

После производства лабораторных исследований приборы были окончательно проверены.

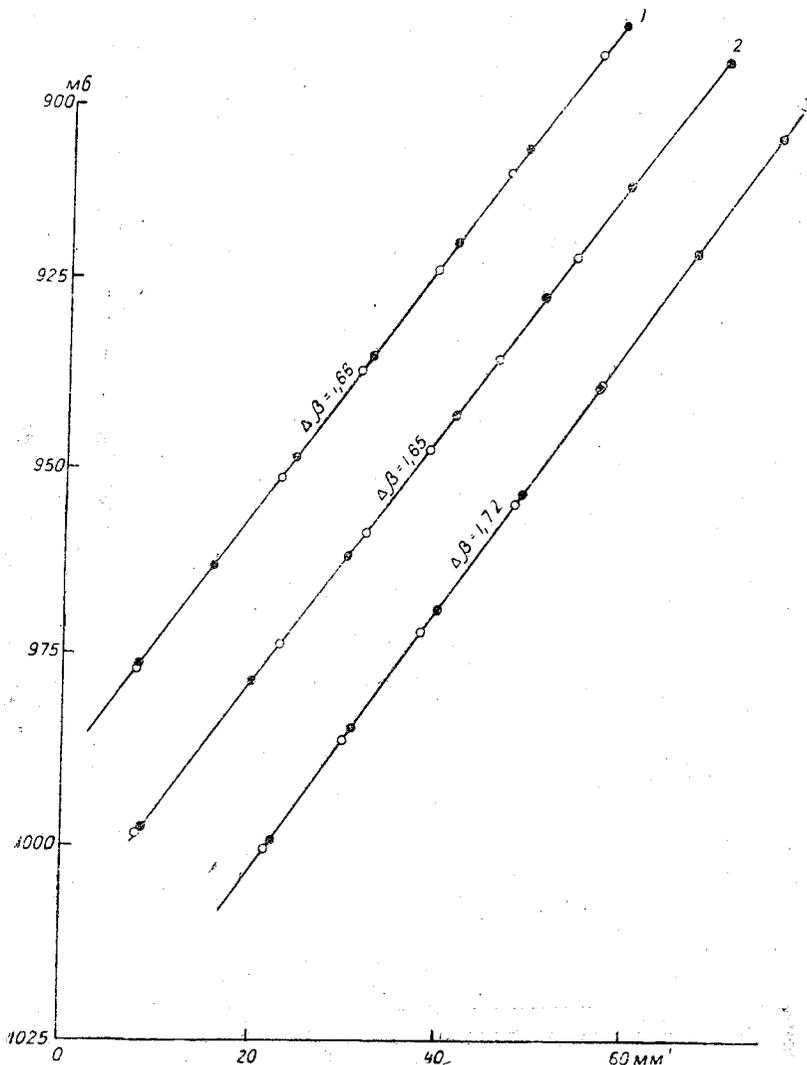


Рис. 4. Тарировка приемника давления.

Тарировка приемника давления производилась в барокамере, ступенями через 10—15 мб. На рис. 4 нанесены следующие кривые: 1 — тарировка

производилась 28/VI, 2 — тарировка 5/IX, после возвращения из Пахта-Аральской экспедиции, 3 — повторная тарировка приемника давления для выявления устойчивости показаний прибора.

За период с июня по октябрь чувствительность изменилась на 0,06 мб на 1 мм ординаты. Данные подъема и спуска практически совпадают во всех случаях. Следовательно, в пределах чувствительности прибора гистерезис не сказывается на показаниях приемника давления.

Приемник давления в приборе не имеет температурного компенсатора, поэтому определение температурной чувствительности столбика барокоробок $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ определялось по перепаду температур, не погружая приемник в жидкость. К сожалению,

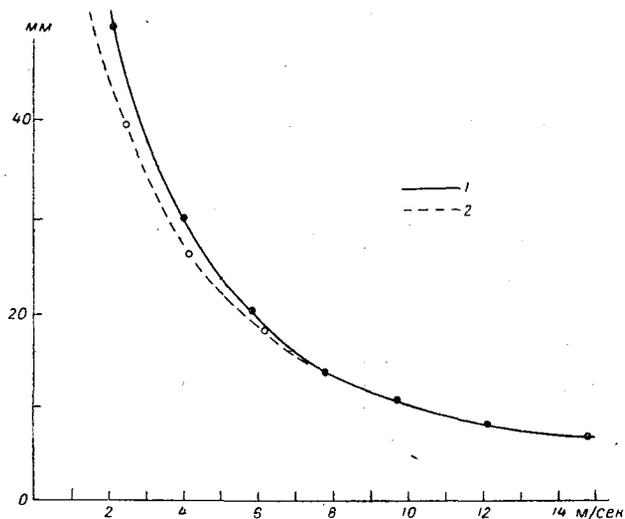


Рис. 5. Проверка приемника средней скорости ветра.
1 — прибор с насадкой, 2 — прибор с вентилятором.

жидкостная проверка $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ из-за расположения столбика коробок затруднена и приходится пользоваться проверкой в воздушной среде.

Проверка приемника температуры производилась в жидкостной ванне при температурах от -30 до $+40^\circ$. Следует отметить, что при погружении термопластинки наблюдается смещение пера температуры на 2,8—3,0 мм, поэтому приходилось держать постоянным угол наклона прибора в жидкостной ванне. Изменения чувствительности приемника температуры после 3-месячного срока не наблюдалось.

Проверка приемника влажности производилась в гигростате. После 3-месячного перерыва средняя величина чувствительности осталась без изменения.

Проверка приемника порывистости ветра производилась в аэродинамической трубе. Прибор помещался в центре рабочего поля трубы, задавались определенные скорости потока и делались выдержки прибора на данной скорости. На ленте получалась ступенчатая запись. Кривая проверки строилась по данным скорости потока в трубе в м/сек. и миллиметрах ординаты площадок записи, отсчитанных от фиксированного пера.

Проверка приемника средней скорости ветра дана на рис. 5. Пунктирная линия дает значения средней скорости ветра для прибора с вентилятором, сплошная кривая — для прибора с насадкой.

Результаты проверки четырех образцов аэростатного метеорографа даны в табл. 8.

Результаты поверки четырех аэростатных метеорографов показывают, что начальные чувствительности всех основных метеорологических элементов укладываются в технические условия.

Таблица 8

Данные поверки аэростатных метеорографов

Наименование элемента	№ приборов			
	7	8	9	10
Средняя чувствительность приемника давления, мб/мм	2,00	1,67	1,67	1,64
Температурная поправка приемника давления, мб/град.	0,07	0,33	0,18	0,06
Средняя чувствительность приемника температуры, град/мм	0,30	0,27	0,38	0,32
Средняя чувствительность приемника влажности (‰/мм) в диапазоне:				
60—100 ‰	1,54	1,47	2,14	2,18
25—60 ‰	1,22	1,00	1,65	1,17
Минимальная скорость потока для вращения полушарий, м/сек.	1,80	1,46	1,60	1,40
Расстояние между двумя соседними зубцами (мм) при скорости:				
2 м/сек.	—	45,0	50,0	28,0
4 "	19,0	27,0	19,0	16,0
6 "	11,0	18,0	10,0	10,0
8 "	8,0	13,0	7,0	7,5
Начальная скорость потока для работы приемника порывистости, м/сек.	2,3	2,0	3,0	2,5
Средняя чувствительность приемника порывистости (м/сек. на мм ординаты) в диапазоне:				
до 6 м/сек.	1,1	0,5	0,5	1,7
6—10 "	3,4	3,3	3,2	5,0
10—15 "	4,2	8,0	7,3	10,3

Предварительные полевые испытания аэростатного метеорографа

Помимо лабораторных испытаний, для выявления возможных погрешностей прибора и качества его работы в соответствии с техническими требованиями была проведена целая серия испытаний прибора в полевых условиях. Эти испытания проводились параллельно с работой приборов по исследованию распределения основных метеорологических элементов в слое до 400—500 м над Воейковым и в экспедиции ГГО в Пахта-Арале.

Полевые испытания проводились по следующим разделам:

- определение величин расхождения записей приемников давления, температуры и влажности воздуха подъема и спуска;
- расчет величин инерции приемников температуры и влажности по данным записей прибора на площадках;
- оценка качества записи отдельных элементов в различных условиях погоды;
- сравнения давления, температуры и влажности воздуха по записям двух приборов, поднимаемых одновременно;
- разработки методики выдержки и подъема приборов;
- определение влияния солнечной радиации.

Сравнение показаний аэростатного метеорографа со стандартными метеорологическими приборами

Эти сравнения проведены по материалам наблюдений экспедиции Пахта-Арал и подъемов в Воейково путем вычисления расхождений в показаниях прибора при выдержке после спуска и показаниях соответствующих метеорологических приборов — анероида и психрометра. Причем показания анероида и психрометра принимались за абсолютные. Результаты сравнения приемника температуры метеорографа с психрометром даны в табл. 9.

Таблица 9

Повторяемость (%) расхождения показаний приемника температуры аэростатного метеорографа с психрометром

Пункт	№ приборов	Разности, от и до										Число случаев
		-1,1 -1,2	-0,9 -1,0	-0,7 -0,8	-0,5 -0,6	-0,3 -0,4	-0,2 +0,2	0,3 0,4	0,5 0,6	0,7 0,8	0,9 1,0	
Пахта-Арал	8	3	6	9	11	14	34	9	5	7	2	91
Воейково	8	—	5	—	10	5	40	25	15	—	—	19
"	9	—	—	4	4	4	42	14	20	8	4	24
	Среднее	1	4	4	8	8	39	16	13	5	2	134
Пахта-Арал	Самолетн. метеорограф	4	8	15	10	10	33	6	10	4	—	49

Повторяемость расхождений в показаниях аэростатного метеорографа и психрометра для трех случаев примерно одинакова. В среднем 39% всех случаев приходится на расхождение в пределах $\pm 0,2^\circ$, 63% всех случаев укладывается в диапазон $\pm 0,4^\circ$, отдельные случаи имеются с расхождениями до $\pm 1^\circ$.

Для сравнения приведены аналогичным путем вычисленные расхождения самолетного метеорографа в Пахта-Арале. Самолетный метеорограф дает 33% всех расхождений в пределах $\pm 0,2^\circ$ и 49% — в пределах $\pm 0,4^\circ$. Показания приемника температуры самолетного метеорографа СМ-43 несколько хуже, чем показания приемника температуры аэростатного метеорографа. Результаты сравнения приемника влажности аэростатного метеорографа с психрометром даны в табл. 10.

Таблица 10

Повторяемость (%) расхождений показаний приемника влажности аэростатного метеорографа и психрометра

Пункт	№ приборов	Разности, от и до										Число случаев
		-9 -10	-7 -8	-5 -6	-3 -4	-2 +2	3 4	5 6	7 8	9 10		
Пахта-Арал . . .	8	1	2	8	16	39	14	6	8	6	94	
Воейково	8	—	—	11	14	34	19	15	5	2	19	
"	9	—	4	4	14	48	13	13	4	—	23	
	Среднее	—	2	8	15	40	16	11	6	2	136	
Пахта-Арал . . .	Самолетн. метеорограф	—	—	2	10	69	14	6	—	—	51	

В среднем 40% всех случаев укладывается в диапазон расхождений влажности ± 2 и 71% всех случаев — в диапазон $\pm 4\%$. Показания приемника влажности самолетного метеорографа СМ-43 в тех же примерно условиях несколько

лучше показаний приемника влажности аэростатного метеорографа. Наконец, результаты сравнения приемников давления аэростатного метеорографа и анероида даны в табл. 11.

Таблица 11

Повторяемость (%) расхождений показаний приемника давления аэростатного метеорографа и анероида

Пункт	№ приборов	Разности, от и до									Число случаев
		-1,5 -1,8	-1,1 -1,4	-0,7 -1,0	-0,3 -0,6	-0,2 +0,2	0,3 0,6	0,7 1,0	1,1 1,4	1,5 1,8	
Пахта-Арал	8	—	—	18	25	34	14	9	—	—	85
Воейково	8	—	—	—	10	30	15	30	10	5	20
"	9	—	—	8	8	34	30	16	—	4	24
	Среднее .	—	—	8	15	33	20	18	3	3	129
Пахта-Арал	Самолетн. метеорограф	4	6	21	15	8	19	15	2	10	42

По средним данным 33% всех случаев приходится на расхождение давления в пределах $\pm 0,2$ мб и 68% — на диапазон $\pm 0,6$ мб. Приемник давления самолетного метеорографа СМ-43 дает значительно худшие результаты, только 42% всех случаев укладывается в диапазон давления $\pm 0,6$ мб.

Влияние солнечной радиации

Для выяснения влияния солнечной радиации был произведен подсчет величин Δp , Δt и Δu при подъеме и спуске за дневные и ночные сроки наблюдений в Пахта-Арале (табл. 12). Днем погода была ясная, со слабыми скоростями ветра, что способствовало нагреванию прибора.

Таблица 12

Сравнение дневных и ночных наблюдений (%) в Пахта-Арале по данным Δp , Δt , Δu

Наблюдения	Температура, град.		Давление, мб		Влажность, %	
	Диапазон, от и до					
	+0,2 -0,2	+0,4 -0,4	+0,2 -0,2	+0,6 -0,6	+2 -2	+4 -4
Дневные	32	50	29	68	41	68
Ночные	30	53	31	59	23	63

Распределение разностей между ночными и дневными наблюдениями по температуре, давлению и влажности практически одинаково.

Результаты измерений по аэростатному метеорографу, произведенные в Пахта-Арале, при самом тщательном анализе их дают основание утверждать, что даже в южных районах при условии применения искусственной вентиляции влияние солнечной радиации невелико и укладывается, очевидно, в пределы точности прибора.

Проводимые по такому же прибору измерения в Голодной Степи при скорости ветра в 4—5 м/сек. уже обходились без искусственной вентиляции.

Сравнение показаний двух аэростатных метеорографов, поднимаемых одновременно

Для выявления расхождений двух приборов, поднимаемых одновременно, была проведена серия таких подъемов. Результаты этих исследований даны в табл. 13. Ввиду того что разброс точек относительно невелик, приводим только среднеарифметические и среднеалгебраические величины расхождений.

Таблица 13

Величины расхождений в показаниях метеорографов № 8 и 9

		Высота, м							
		35	50	100	150	200	300	400	500
Температура, град.	Среднеарифм.	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4
	Среднеалг.	-0,05	0,02	-0,08	-0,08	-0,04	-0,13	-0,22	-0,31
Давление, мб	Среднеарифм.	0,25	0,61	0,81	1,26	1,67	1,82	2,2	2,4
	Среднеалг.	-0,25	-0,61	-0,81	-1,26	-1,67	-1,82	-2,2	-2,4
Влажность, %	Среднеарифм.	1,5	1,5	2,3	2,5	2,5	2,3	3,5	4,4
	Среднеалг.	-0,5	-0,5	0,4	0,3	0,5	0,6	0,3	0,4

Расхождения в давлении воздуха обуславливают ошибку в определении высоты около 5—40%. Эти ошибки частично вызваны, очевидно, неточностями поверки прибора, поэтому необходимо особенно тщательно проверять все приемники прибора.

Ниже приводятся данные сравнения двух самолетных метеорографов СМ-542 и СМ-298, поднимаемых одновременно в Каменной Степи в июле 1951 г. (табл. 14).

Таблица 14

Величины расхождений в показаниях метеорографов СМ-542 и СМ-298

		Высота, м								
		60	100	150	200	300	500	1000	1500	2000
Температура, град.	Среднеалг.	-0,05	-0,14	-0,05	-0,10	-0,12	-0,51	-0,45	-0,19	-0,45
	Среднеабс.	0,26	0,42	0,44	0,40	0,38	0,80	0,72	0,65	0,60
Влажность, %	Среднеалг.	0,83	0,92	1,56	1,58	1,92	0,53	-0,01	1,55	0,55
	Среднеабс.	1,67	3,20	3,84	3,06	3,54	2,06	3,28	4,16	4,66

Расхождения показаний температуры и влажности самолетных метеорографов СМ-542 и СМ-289 больше по всем высотам, чем аэростатных метеорографов № 8 и 9.

Определение коэффициента инерции приемников температуры и влажности

Кроме определения коэффициента инерции в лабораторных условиях, производилось определение его по материалам подъема аэростатного метеорографа по формуле

$$\alpha = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\ln \frac{T_1 - T}{T_2 - T}},$$

где τ_1 и τ_2 — время замеров температуры, T_1 и T_2 — значения температуры по термодатчику, T — температура среды (точки 3, 4, 5) на рис. 6.

По метеорограммам подъемов вычислялась температура T_1 в момент остановки аэростата на соответствующей высоте (точки $2a, 3a, 4a$) и температура среды T , когда кривая шла горизонтально, т. е. установилось равенство температур приемника и среды. Далее на участках кривой охлаждения или нагревания термоприемника, ограниченных точками $2a-3, 3a-4, 4a-5$, находились точки $2', 3', 4'$ с такими значениями температуры T_2 , чтобы выражение $\frac{T_1 - T}{T_2 - T}$ стало равно 2,713 —

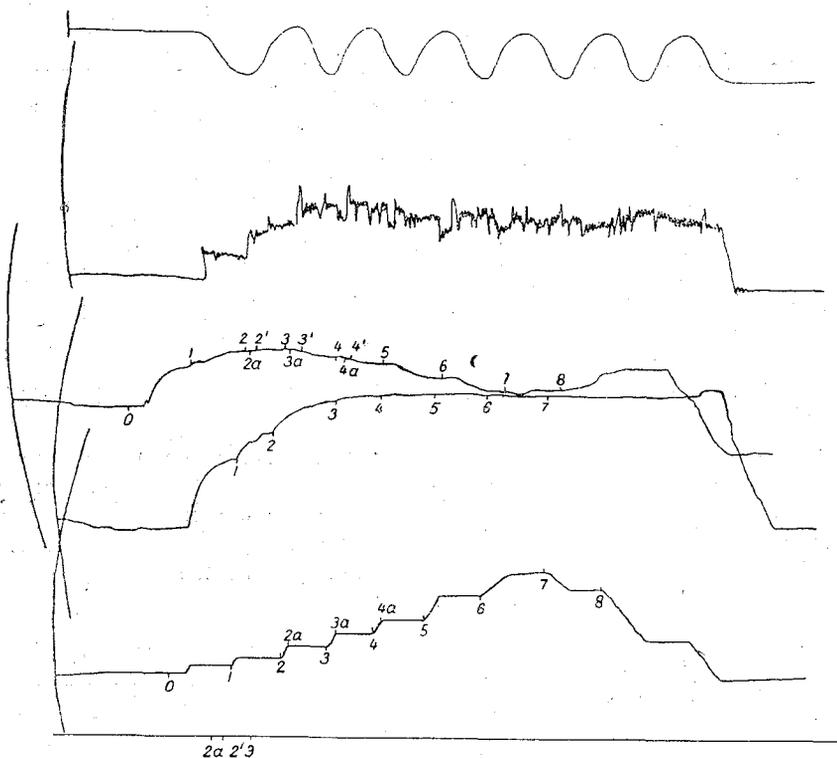


Рис. 6. Пахта-Арал. Подъем № 103, М-Ф № 8, 16/VII 1952 г., 18 час. 00 мин. — 19 час. 07 мин.

основанию натуральных логарифмов. Промежутки времени, необходимые для изменения показаний приемника от T_1 до T_2 , и принимались за коэффициент инерции α .

Одновременно по записям метеорографа можно определить и значение средней скорости ветра на соответствующих высотах. Это позволило найти зависимость значений коэффициента инерции от скорости ветра.

Ниже приводятся средние значения коэффициента инерции термоприемника в зависимости от скорости ветра (табл. 15).

Таблица 15

Величины коэффициентов инерции приемника температуры

Скорость ветра, м/сек.	7	8	9	10
Коэффициент инерции α мин.	1,33	1,21	1,09	0,95
Крайние значения α	1,52	1,44	1,30	1,08
	1,08	0,97	0,90	0,81

Полученный ряд значений α с достаточной точностью соответствует известному соотношению $\alpha_1 = \alpha_2 \sqrt{\frac{v_2}{v_1}}$, где v_1 и v_2 — скорости ветра при определении значений α_1 и α_2 .

Аналогично производилось вычисление коэффициента инерции приемника влажности. Использовался материал экспедиции Пахта-Арал. Влажность у земли была порядка 50—80%, а с высотой понижалась до 10—20%. Получили следующие средние значения коэффициента инерции:

- 1) при увеличении влажности $\alpha = 1,69$ мин. (максимальное значение $\alpha = 2,88$ мин., минимальное значение $\alpha = 0,90$ мин.);
- 2) при уменьшении влажности $\alpha = 3,27$ мин. (максимальное значение $\alpha = 6,4$ мин., минимальное значение $\alpha = 1,79$ мин.).

И в первом и во втором случае прибор вентилировался вентилятором с электромоторчиком (скорость потока в шахте составляла 6 м/сек. при 12 вольтах). Можно считать, что на 5-минутных площадках прибор показывает близкие значения температуры и влажности к действительным.

Методика выдержки и подъема аэростатного метеорографа

Выдержка прибора является весьма ответственной операцией, от которой в значительной степени зависит ценность последующих измерений.

Размеры нашего прибора были несколько больше размеров внутренней части психрометрической будки, и поэтому пришлось отказаться от использования будки для выдержки прибора. Была выработана для этой цели защита, показанная на рис. 7. На столбе высотой 2 м укреплялась легкая фанерная крыша, поворачиваемая во все стороны и установленная так, чтобы приборы были в плоскости ветра. Под крышу подвешивались аэростатные метеорографы. У прибора, который готовился к подъему, за 7—10 мин. до начала подъема опускались перья. При ветре менее 3—4 м/сек. прибор искусственно вентилировался в продолжении 10—15 мин. После подъема прибор снова вешался под защиту для производства выдержки. Техника подготовки прибора, выдержки и отсчета по контрольным приборам стандартная, и поэтому мы ее не описываем. Методика же подъема была принята следующей.

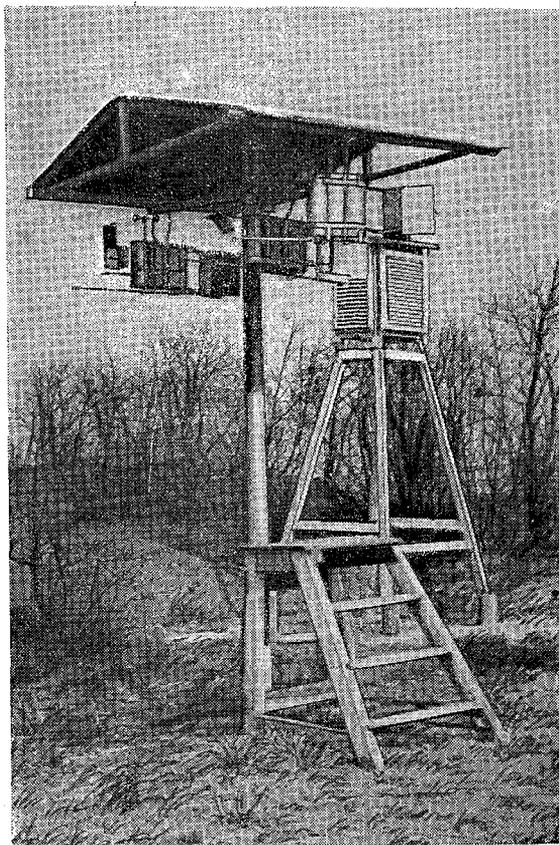


Рис. 7.

Подъем аэростатного метеорографа производился до высоты 400—500 м с 5-минутными выдержками на высотах 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400 и 500 м; при спуске выдержки делались по 5 мин. на высотах 300 и 100 м и спуск в обработку обычно не шел. Вся операция подъема занимала 1 час 15 мин. — 1 час 20 мин. Следующий подъем начинался ровно через 2 часа после начала первого, т. е. был перерыв между подъемами 40—45 мин. В этот перерыв поднимался прибор для регистрации порывистости ветра с оборотом барабана за 20 мин. Как показал опыт, чаще чем через 2 часа зондирование производить нерационально.

Вид записи аэростатного метеорографа при слабой скорости ветра дан на рис. 8 и с наличием ветра и слабой его порывистостью на рис. 9.

Верхняя кривая соответствует записи средней скорости ветра; когда ветра нет, на ленте получается прямая линия.

Вторая сверху кривая — запись порывистости ветра. Ордината дает величину средней скорости ветра, а амплитуда — порывистость ветра, вернее горизонтальную составляющую порывов скорости ветра. С увеличением амплитуды порывистость возрастает.

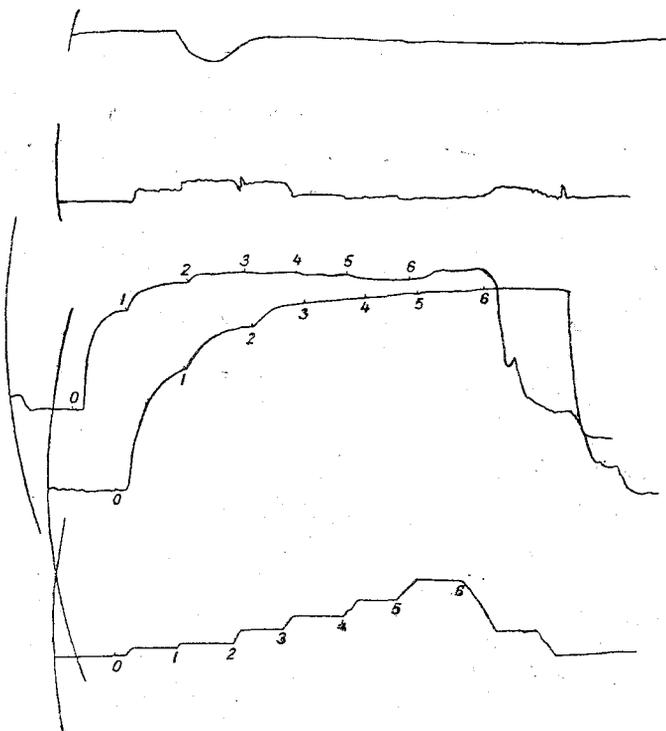


Рис. 8. Пахта-Арал. Подъем № 124, М-Ф № 8, 18/VII 1952 г., 19 час. 58 мин.—21 час. 05 мин.

Третья сверху кривая — запись температуры воздуха, причем с увеличением температуры воздуха ордината растет.

Четвертая сверху кривая — влажность воздуха; рост ординаты соответствует уменьшению относительной влажности.

Вторая снизу кривая — давление воздуха. Нижняя линия — постоянная, фиксированная линия. На всех записях отмечено резкое уменьшение относительной влажности с высотой и наличие инверсии температуры воздуха.

Прибор № 8 при сильных скоростях ветра иногда давал слегка размазанную запись приемника давления и температуры. Вид записи дан на рис. 10. Скорость ветра была около 12—15 м/сек. с сильной порывистостью. Для устранения таких размазанных записей приходилось несколько регулировать прижатие пера к барабану и изменять трение в осях. Большинство записей получалось удовлетворительного качества.

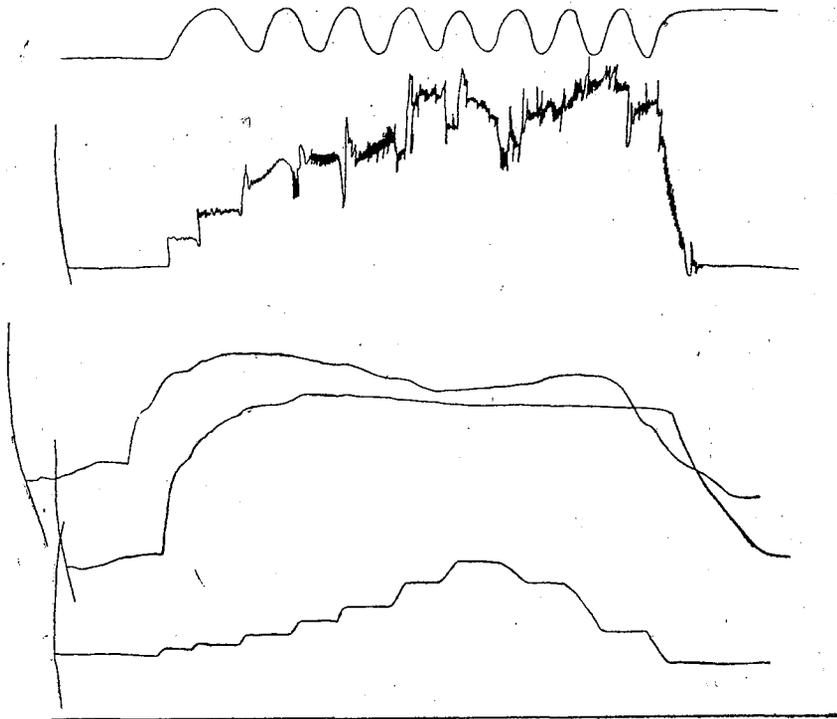


Рис. 9. Пахта-Арал. Подъем № 105, М-Ф № 8, 16/VII 1952 г.,
19 час. 55 мин.—21 час. 03 мин.

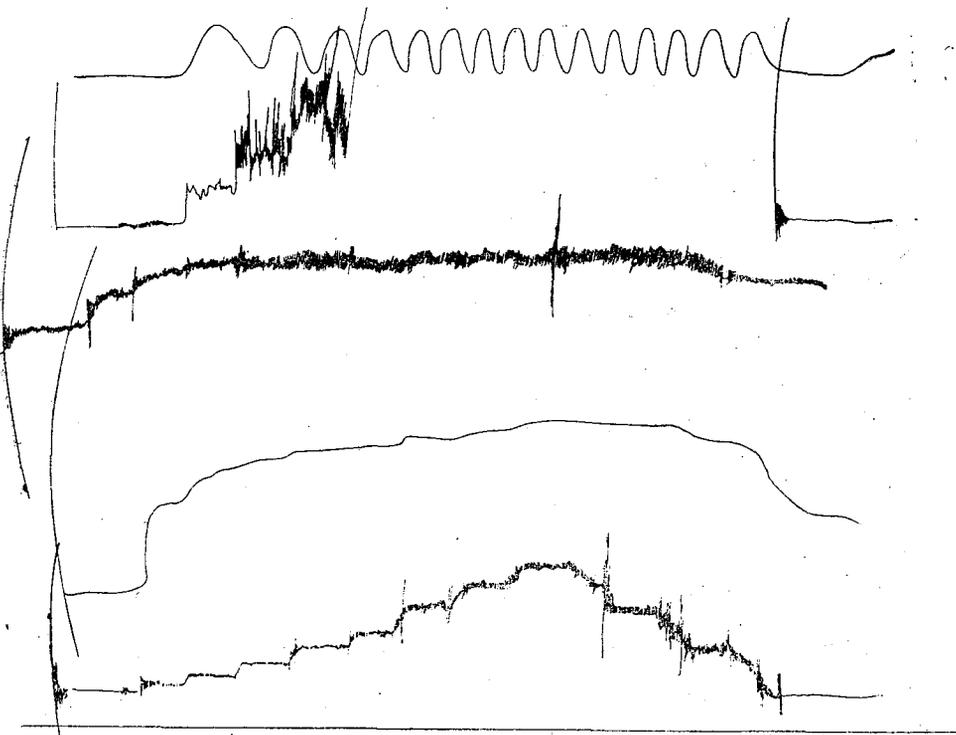


Рис. 10. Пахта-Арал. Подъем № 180, М-Ф № 8, 31/VII 1952 г.,
5 час. 57 мин.—7 час. 16 мин.

Точность измерения метеорологических элементов аэростатных метеорографов

Порядок ошибки величин получим, приняв во внимание совокупность погрешностей как инструментальных, так и возникающих в процессе обработки.

При этом подсчете принимается, что ошибки поверки метеорографа и отсчетов по абсолютным приборам при выдержке равны нулю.

К инструментальным погрешностям относятся: инерция приемников; трение в передаточном механизме; гистерезис и для приемников ветра влияние наклона и раскачивания прибора, прикрепленного к тросу.

К погрешностям обработки относятся погрешности: в снятии ординат с метеорограмм, в отсчете ординат по поверке, в отсчете значений измеряемых элементов по поверке.

Особое положение занимает погрешность, вызываемая влиянием прямой солнечной радиации, которая здесь не рассматривается, так как этой ошибки при вентиляции и двойной защите кожуха не обнаружено.

Подсчет погрешностей по каждому измеряемому элементу дал следующие результаты.

Давление. 1. Инерция приемника давления может быть приравнена нулю. Гистерезис не учитывается, так как при тарировке прямая подъема и спуска совпадают.

2. Погрешность, вызываемая трением в передаточном механизме, определялась двумя способами: 1) измерением смещения пера при сотрясении находящегося в покое прибора — крайние отклонения среднего смещения оказались равными 0,8—0,4 мм; 2) сравнением ординат при подъеме и спуске прибора — средняя разность оказалась равной $\pm 0,3$ мм при крайних значениях $+1,0$; $-0,5$ мм. Выражая большее из средних смещений в единицах давления по чувствительности, указанной в описании, получим $\Delta B_2 = 1,67 \cdot 0,48 = 0,8$ мб.

3. Принимая во внимание, что толщина записи рассматриваемого метеорографа такая, как и у самолетного метеорографа, следует признать одинаковой и точность снятия ординат с метеорограммы, т. е. $\pm 0,2$ мм. В переводе на давление это составит $\Delta B_3 = 0,34$ мб.

4. Аналогичные предыдущему пункту и равные по величине $\pm 0,2$ мм ошибки имеют место и в отсчетах ординат по сертификату поверки. Однако влияние этой ошибки уменьшается увеличением масштаба ординат на сертификате. Принимая масштаб 1 мм ординаты на метеорограмме равным 5 мм ординаты на сертификате, погрешность, выраженную в единицах давления, удастся довести до $\Delta B_4 = 0,07$ мб.

5. Одновременно с ошибочным отсчетом ординаты по сертификату, но независимо от него, возникает ошибка в отсчете значения по кривой сертификата. Она также равна $\pm 0,2$ мб. Для уменьшения ошибки, выраженной в единицах давления, масштаб на сертификате принят 1 мб = 5 мм, вследствие чего погрешность в снятии значений давления оказывается равной $\Delta B_5 = \pm 0,07$ мб.

Все рассмотренные погрешности являются случайными и независимыми, и максимальная погрешность может быть найдена из выражения

$$\Delta B_{\text{макс}} = \pm \sqrt{\Delta B_2^2 + \Delta B_3^2 + \Delta B_4^2 + \Delta B_5^2}$$

или

$$\Delta B_{\text{макс}} = \pm \sqrt{0,64 + 0,12 + 0,01 + 0,01} = \pm 0,88 \text{ мб.} \approx \pm 0,9 \text{ мб.}$$

Средняя погрешность, равная $1/3$ максимальной, будет равна

$$\Delta B = \pm 0,3 \text{ мб.}$$

Из 84 случаев сравнения значений давления по метеорографу после спуска и по барометру получены расхождения в пределах от $+1,5$ до $-1,7$ мб, в среднем 0,5 мб.

Температура. Значения коэффициента инерции даны в описании прибора. Зная зависимость величины его от скорости ветра, можно подсчитать поправку при подъеме как $\Delta t = \alpha \gamma \frac{\Delta h}{100}$, где γ — вертикальный градиент температуры, Δh — скорость подъема в м/мин.

При неподвижном аэростате поправка может быть вычислена по формуле $\Delta t = \alpha \frac{t_2 - t_1}{\Delta \tau}$, где t_1 и t_2 — значения температуры по показаниям метеорографа в начале и конце промежутка времени $\Delta \tau$, для которого производится обработка.

Влияние трения, как и по бароприемнику, определялось двумя способами: 1) по измерению смещения пера при встряхивании прибора, находящегося в покое, и 2) по сравнению ординат при подъеме и спуске с учетом изменения температуры между этими двумя моментами, за исключением погрешности от инерции. Первый способ дал среднее отклонение $\pm 0,80$ мм при крайних значениях $-3,0$; $+2,0$ мм, второй — среднее отклонение $\pm 1,3$ мм при крайних значениях $-2,0$; $+3,0$ мм. Принимая большее из найденных средних значений, получим погрешности в переводе на температуру по чувствительности: $\Delta t_2 = 0,27 \cdot 1,3 \pm 0,35^\circ$.

Принимая во внимание точность снятия ординат с метеорограммы и с графика поверки, а также точность отсчетов температуры по кривой поверки, равной, как и для давления, $0,2$ мм, и учитывая чувствительность термоприемника $0,27^\circ$ на 1 мм ординаты, а также масштаб на сертификате 1 мм ординаты на метеорограмме равен 5 мм на графике и 1° температуры — 5 мм на графике, получим следующие погрешности давления:

Погрешность при снятии ординаты с метеорограммы $\Delta t_3 = 0,27 \cdot 0,2 = 0,05^\circ$.

Погрешность при отсчете ординаты по поверке $\Delta t_4 = 0,27 \cdot 0,2 \cdot 0,2 = 0,011^\circ$.

Погрешность при отсчете значения температуры по поверке $\Delta t_5 = 0,27 \cdot 0,2 \cdot 0,2 = \pm 0,011^\circ$.

Максимальную погрешность получим из выражения

$$\Delta t_{\text{макс}} = \pm \sqrt{0,35^2 + 0,05^2 + 0,011^2 + 0,011^2} = \pm 0,36^\circ,$$

средняя погрешность $\Delta t = \pm 0,1^\circ$.

Из сравнения 93 пар значений температуры по метеорографу при выдержке после спуска, с введенной поправкой на инерцию, и по психрометру получены следующие расхождения: крайние расхождения $+1,8^\circ$; $-1,9^\circ$, среднее $\pm 0,3^\circ$.

Влажность. 1. Значение коэффициента инерции дано в описании. Поправка может быть подсчитана аналогично указанному для термоприемника.

2. Влияние трения определено, как и для температуры. Первый способ дал среднее смещение пера $\pm 2,0$ мм, второй $\pm 2,6$ мм при крайних значениях $-4,3$; $+5,1$ мм. Принимая для расчета большее из найденных средних значений, получим погрешность в переводе на единицы влажности по средней чувствительности данной в описании:

$$\Delta F_2 = 1,3 \cdot 2,6 = \pm 3,4\%.$$

Поверка вычерчивается в ординарном масштабе. Поэтому погрешности при снятии ординат по метеорограмме, нахождение их на сертификате поверки и при отсчете значения влажности одинаковы и равны $0,2$ мм, а в переводе на единицы влажности по средней чувствительности $\Delta F_2 = \Delta F_4 = \Delta F_3 = \pm 1,3 \cdot 0,2 = \pm 0,26\%$.

Максимальная погрешность равна

$$\Delta F_{\text{макс}} = \sqrt{3,4^2 + 3(0,26)^2} = \pm 4,6\%;$$

$$\Delta F_{\text{ср}} = \pm 1,5\%.$$

Из сравнения 89 пар значений влажности, полученных по метеорографу после спуска, с влажностью, определенной по психрометру, получилось среднее расхождение $+3,0\%$ при крайних отклонениях $+9\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов П. А. Аэрология. Гидрометеоздат, 1938.

ОПЫТ ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОСТАТНОГО МЕТЕОРОГРАФА

В работе приводятся результаты лабораторных исследований аэростатного метеорографа, описанного в настоящем сборнике. Прибор предназначен для зондирования слоя атмосферы от поверхности земли до высот порядка 500 м с помощью привязного аэростата. Этот слой характеризуется развитой турбулентностью и резкими колебаниями температуры, влажности, направления и скорости ветра, поэтому приборы для исследования его должны обладать большой чувствительностью.

Рассматриваемый прибор регистрирует температуру, давление, влажность, среднюю скорость и порывистость ветра. Лабораторные исследования проведены по всем приемникам прибора. Наиболее полные данные получены для приемников температуры.

Инерция термоприемника прибора. Для аэростатного метеорографа необходимо прежде всего подобрать биметаллическую пластинку большой чувствительности и найти такое положение ее относительно потока, чтобы коэффициент инерции был по возможности небольшим.

Одним из основных факторов, влияющих на показания температуры метеорографов, является инерция биметаллических пластинок.

Инерция обуславливается тем, что пластинка не мгновенно воспринимает температуру окружающего воздуха, а постепенно, — лишь через некоторый промежуток времени температура пластинки и окружающей среды выравнивается.

Для учета влияния термоинерции используется обычно формула

$$T = T' + \alpha \frac{dT'}{dt},$$

где T — температура среды, T' — температура, отмеченная термометром, t — время, α — коэффициент инерции. Коэффициент инерции определяется временем, в течение которого разность температуры среды и температуры, отмеченной прибором, уменьшится в e раз.

Как известно, коэффициент термоинерции определяется по формуле

$$\alpha = - \frac{mc}{hs},$$

где m — масса пластинки, c — удельная теплоемкость пластинки, h — коэффициент конвективной теплопроводности, s — поверхность термоприемника. Кроме того, коэффициент инерции зависит от скорости вентиляции v и от плотности воздуха ρ .

В 1948 г. А. Г. Бергун [2] теоретически рассчитал коэффициент термоинерции на основе современных представлений о ламинарном пограничном слое, образующемся у поверхности пластинки в потоке, и получил выражение для коэффициента инерции в зависимости от величины ρv .

Как известно, высота пограничного слоя потока зависит от формы пластинки и от положения ее относительно потока, следовательно можно подобрать такое положение пластинки, в котором коэффициент инерции значительно меньше, чем

в других положениях. Поэтому была поставлена задача экспериментальным путем определить коэффициент инерции трех различных биметаллических пластинок при различном положении их относительно потока. На рис. 1 приведены пластинки № 1 и 3. Пластика № 2 была одинаковой формы с пластинкой № 1, но больше по размеру и тоньше ее.

Коэффициент инерции определялся следующим способом. Пластины укреплялись вместо приемников температуры и давления радиозонда, затем нагревались спи-

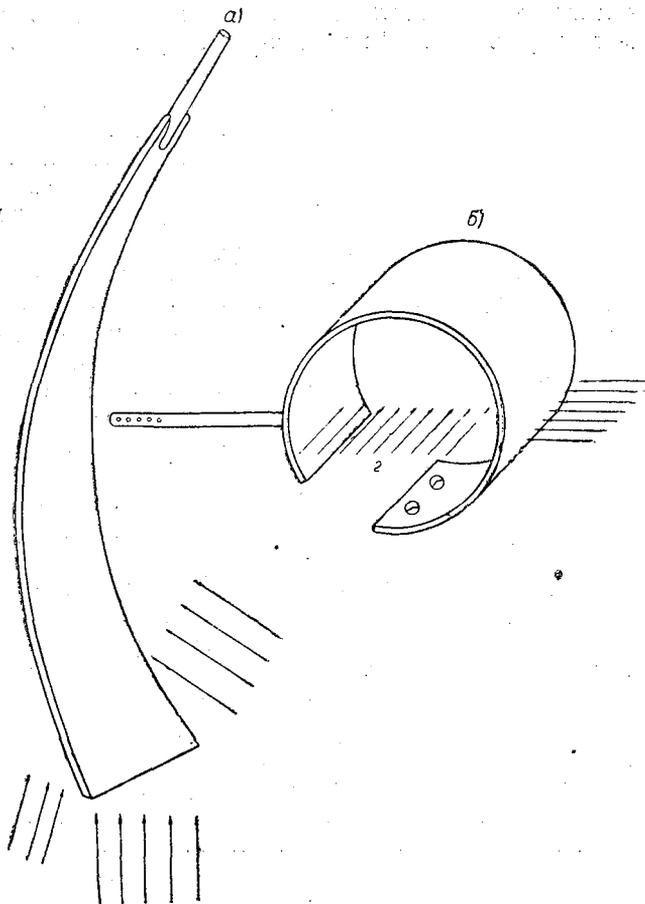


Рис. 1.

а) пластинка № 1, б) пластинка № 3.

ралью и вентилировались в трубе, одновременно определялась температура воздуха по термометру. Скорость потока измерялась анемометром с мельничкой. При охлаждении пластинки отмечалось положение пера на шкале.

Коэффициент инерции вычислялся графически. По оси x откладывалось время в минутах, по оси y — величина $\ln(a - a_1)$, где a_1 — положение пера в момент отсчета; a — положение пера, когда пластинка принимает температуру окружающей среды. На графике получалась прямая линия. Коэффициент инерции определялся по углу наклона этой прямой:

$$\lambda = \ln e \operatorname{ctg} \gamma.$$

где λ — коэффициент инерции, γ — угол наклона.

В случае больших скоростей точки хорошо ложились на прямую, а в случае малых скоростей получался небольшой излом прямой. Сначала остывание пластинки

шло быстро, а затем замедлялось. В этом случае коэффициент инерции находился как среднее из значений, определенных по двум этим прямым. На рис. 2 дана зависимость коэффициента инерции от скорости потока при различном положении пластинок относительно потока.

Для пластинки № 1 в положениях I и II значения коэффициентов инерции практически совпадают, а в положении III коэффициент инерции значительно меньше, чем в положениях I и II. При скорости потока 4,5 м/сек. коэффициент инерции в положениях I и II равен 0,74 мин., а в положении III — 0,50 мин. Очевидно, если пластинка вогнутостью обращена к потоку, то поток, ударяясь о поверхность пластинки, срывает большую часть пограничного слоя и тем самым

теплообмен улучшается. В положениях I и II поток скользит по поверхности пластинки и срывает гораздо меньшую часть пограничного слоя.

Для пластинки № 2 получились аналогичные результаты, но различие коэффициентов значительно меньше. При скорости потока 4—5 м/сек. коэффициент инерции в положениях I и II равен 0,33 мин., а в положении III — 0,26 мин.

Для пластинки № 3 наилучшим оказывается положение II. Коэффициент инерции в положении I равен 0,58 мин., а в положении II — 0,42 мин. Это различие коэффициентов инерции для пластинки № 3 объясняется, очевидно, тем, что в положении I вся внутренняя часть фактически не вентилируется, а в положении II вентилируется вся пластинка.

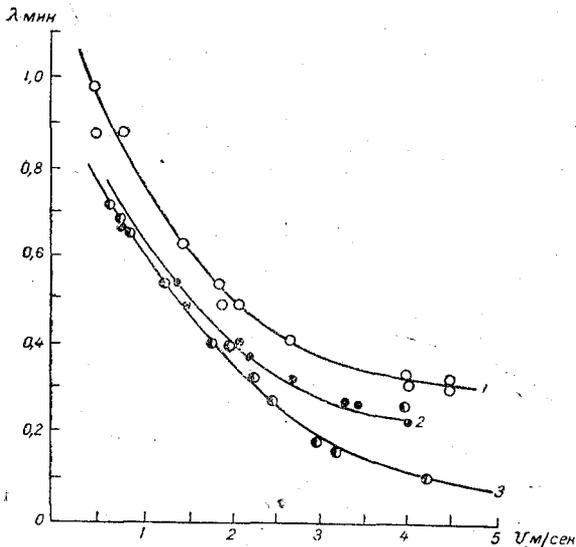


Рис. 2. Сравнение коэффициентов инерции для различных положений пластинок.
1 — положение I, 2 — положение II, 3 — положение III.

Кроме того, в положении II пластинка расположена к потоку своим наибольшим ребром, а коэффициент инерции пропорционален корню квадратному из длины ребра, расположенного по потоку, следовательно это более выгодное положение такого типа пластинок.

Если сравнивать коэффициенты инерции пластинок в их наилучшем положении относительно потока, то видно, что наименьший коэффициент инерции получается для пластинки № 2, а наибольший — для пластинки № 1.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов инерции при скорости потока 4,5 м/сек. для различных пластинок в их наилучшем положении и значения коэффициентов чувствительности в градусах на 1 мм ординаты, причем исключено влияние передаточного механизма.

Таблица 1

Номер пластинки . . .	1	2	3
Чувствительность пластинки, мм/г	20,8	8,1	4,6
Инерция пластинки . . .	0,50	0,27	0,45

Сравнивая коэффициенты инерции и коэффициенты чувствительности пластинок, видим, что выгоднее использовать пластинку № 2. Для пластинки № 2 коэффициент чувствительности больше, чем для пластинки № 3, но и коэффициент инерции значительно меньше.

На основании этих измерений в аэростатном метеорографе и была окончательно установлена пластинка типа № 1 и 2 в положении III.

Коэффициент термической инерции прибора в целом зависит от массы прибора и от вентиляции шахты последнего. Поэтому была выяснена термическая инерция всего прибора.

Определение коэффициента инерции прибора проводилось в аэродинамической трубе. Прибор целиком нагревался в термостате до определенной температуры, затем вентилировался в трубе. При охлаждении делались засечки на метеорограмме через 5, 10, 15 сек., в зависимости от скорости спада температуры. Коэффициент инерции определялся без кожуха, но с навинченной шахтой прибора. Зависимость коэффициента инерции от скорости потока в трубе представлена на рис. 3.

Если проследить ход зависимости коэффициента инерции от скорости потока, то видно, что в интервале скоростей от 0 до 2 м/сек. уменьшение коэффициента инерции с увеличением скорости потока идет очень быстро, затем постепенно замедляется и, начиная с 3 м/сек., кривая переходит в почти прямую линию.

В табл. 2 приведены величины расхождений показаний прибора и истинной температуры среды через определенные интервалы времени при скорости вентиляции 3,5 м/сек.

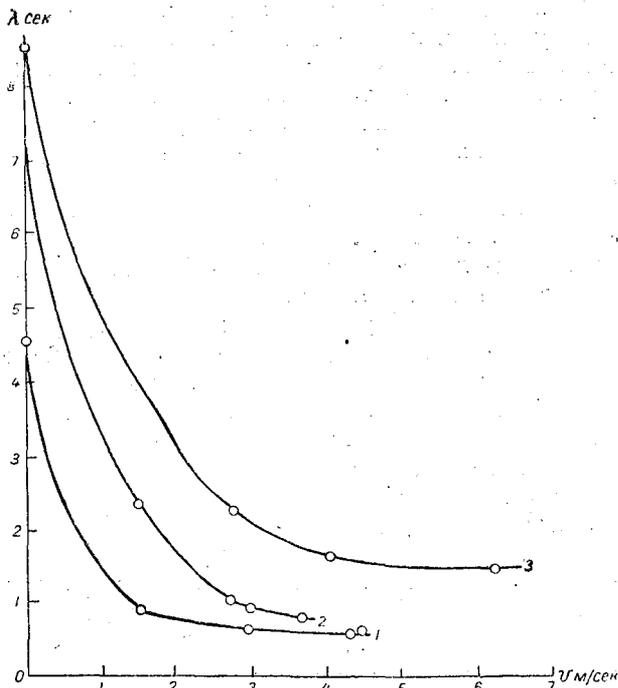


Рис. 3.

1 — нагревание спирали; 2, 3 — нагревание в термостате (2 — вентиляция в трубе, 3 — искусственная вентиляция).

Таблица 2

Время, мин.	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0
Расхождение в показаниях прибора и истинной температуры, град.,	1	0,37	0,14	0,05	0,02	0,007

Из таблицы видно, что через 4 мин. при указанной скорости вентиляции прибор фактически показывает истинную температуру воздуха. Следовательно, при скоростях ветра, больших 3 м/сек., 5-минутная выдержка прибора на площадке вполне достаточна, чтобы прибор показал истинную температуру воздуха. При меньших скоростях ветра значения коэффициента инерции резко увеличиваются, однако удлинять время выдержки аэростата на площадке нельзя рекомендовать, так как это сильно удлинит время подъема и нарушит репрезентативность зондирования. Кроме того, в этих случаях на показаниях прибора будет сказываться влияние солнечной радиации, поэтому для получения истинной температуры воздуха необходимо вводить поправки на инерцию.

Для выяснения влияния массы прибора на величину коэффициента термической инерции были произведены следующие опыты: 1) прибор нагревался в термостате и определялся коэффициент инерции при отсутствии вентиляции, 2) нагревался не весь прибор, а только одна пластинка. В первом случае коэффициент инерции получился равным 5,81 мин., во втором — 4,57 мин. Очевидно, это различие вызвано значительной массой прибора. Кроме того, около прибора застаивается

сильно нагретый воздух, а это также уменьшает теплообмен между пластинкой и окружающей средой.

В дальнейшем был определен коэффициент инерции прибора при нагреве пластинки спиралью в зависимости от скорости вентиляции в шахте. Зависимость коэффициента инерции от скорости потока дана на рис. 2.

Рисунок 2 показывает, что при нагревании одного термоприемника кривая инерции значительно ниже, чем при нагревании прибора в термостате, т. е. коэффициент инерции при нагревании только термоприемника меньше, чем при нагревании всего прибора. Так, например, при скорости ветра 3,5 м/сек. коэффициент инерции при нагревании термоприемника равен 0,6 мин., а при нагревании прибора в термостате — 0,8 мин.

Выяснению влияния массы прибора на тепловую инерцию посвящена была работа И. П. Егоренкова [3]. Им определялся коэффициент инерции для всего метеорографа и для приемника отдельно. Получились одинаковые значения коэффициента инерции для всех метеорографов, кроме аэростатного. Различие коэффициента инерции для всего аэростатного метеорографа и для приемника отдельно автор объяснил тем, что в аэростатном метеорографе защита жалюзийная и, следовательно, скорость вентиляции уменьшается.

Объяснить различие коэффициентов инерции для аэростатного метеорографа и для приемника отдельно тем, что скорость вентиляции приемника меньше, в трубке, нельзя, так как скорость потока в шахте составляет 1,08 скорости потока в трубе, следовательно это различие коэффициентов инерции вызвано влиянием массы прибора.

Для выяснения влияния кожуха прибора на величину термоинерции был определен коэффициент инерции как с кожухом, так и без кожуха при отсутствии вентиляции. Получены следующие значения коэффициента инерции: прибор с кожухом — 8,54 мин., прибор в кожухе — 8,62 мин.; отсюда видно, что влияние кожуха прибора незначительно и может не учитываться при расчетах необходимого времени выдержки прибора на площадках и введении поправок на инерцию.

В заключение выражаем глубокую благодарность за руководство работой ценные указания П. А. Воронцову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов П. А. и Соколов С. М. Методика аэрологических исследований на нижнем слое атмосферы. Труды ГГО, вып. 28, 1951.
2. Бергун А. Т. Термическая инерция пластинчатого термометра в ламинарном потоке. Труды ЦАО, вып. 3, 1948.
3. Егоренков И. П. Инерция термоприемников аэрологических приборов. Труды ИГиГМС, серия 1, вып. 19, 1946.

Редактор М. П. Тимофеев. Корректор Г. М. Лысенко. Техн. редактор М. И. Брайтман.

Сдано в набор 19/II 1953 г. Подписано к печати 17/VI 1953 г. Изд. № 1
Индекс М-Л-17. Бумага 70×108¹/₁₆. Бум. л. 2,38. Печ. зн. в 1 бум. л. 118 91
Печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 7,06. Тираж 600 экз. М-32648. Заказ № 60
Гидрометеониздат, г. Ленинград, 1953. Цена 4 руб. 95 коп.

2-я типолитография Гидрометеониздата, Ленинград, Прачечный пер., д. 6.

