Методы зондирования окружающей среды

Аэрологические оптические шар-пилотные наблюдения

Профессор Кузнецов Анатолий Дмитриевич

Российский государственный
гидрометеорологический университет

Одной из основных задач аэрологических измерений является получение информации о параметрах ветра и их распределении с высотой.

Для измерения скорости и направления ветра в атмосфере могут быть использованы различные методы, однако наиболее широко применяется метод , когда для получения информации о ветре в ее значительной нижней части (тропосфере и стратосфере) используются наблюдения за перемещением объектов (трассеров), которые одновременно перемещаются в **горизонтальном** и в **вертикальном** направлениях.

Перемещение в **горизонтальном** направлении осуществляется за счет движения воздушных потоков, а в **вертикальном** направлении — либо за счет силы Архимеда, либо за счет силы земного притяжения.

Трассерами могут являться:

- **шары-пилоты**, в качестве которых обычно используют оболочки, наполненные газами легче воздуха (зондирование снизу вверх),

- специальные **мишени**, опускающиеся **на парашютах** (зондирование сверху вниз).

Определение скорости и направления ветра при этом основано на измерении изменений координат таких трассеров за определенный интервал времени.

По временным интервалам между измерениями координат могут быть рассчитаны **средняя** скорость ветра и его направление **в слое атмосферы**, толщина которого определяется вертикальной скоростью перемещения объекта и интервалами времени между смежными отчетами.

В зависимости от способа определения координат перемещающегося объекта в атмосфере можно выделить **три** разновидности данного метода:

- **оптический**,

- **радиотехнический,**

- **навигационный**.

При осуществлении ***оптического*** метода наблюдения за перемещением объекта в атмосфере выполняются с помощью специальных угломерных приборов — аэрологических теодолитов.

Радиотехнический метод предполагает измерение координат объекта с помощью специальных радиотехнических устройств — радиотеодолитов или радиолокационных станций.

В ***навигационном*** методе положение объекта в атмосфере определяется с помощью спутниковых навигационных систем (ранее - сигналов специальных навигационных наземных станций) .

Среди указанных методов наибольшей простотой обладают **оптические шар-пилотные наблюдения**, суть которых состоит в наблюдении с помощью аэрологического теодолита за перемещением в горизонтальной и вертикальной плоскостях оболочки, наполненной газом легче воздуха и свободно увлекаемой воздушным потоком.

Оптические однопунктные шар-пилотные измерения скорости и направления ветра в свободной атмосфере

Для организации оптических однопунктные шар-пилотных измерений скорости и направления ветра в свободной атмосфере необходимо:

1. Латексная оболочка.

2. Комплект аппаратуры для наполнения оболочки: баллон с водородом, редуктор и шланг для подачи водорода в оболочку, грузики для определения свободной подъемной силы оболочки, весы для взвешивания оболочки перед наполнением ее водородом.

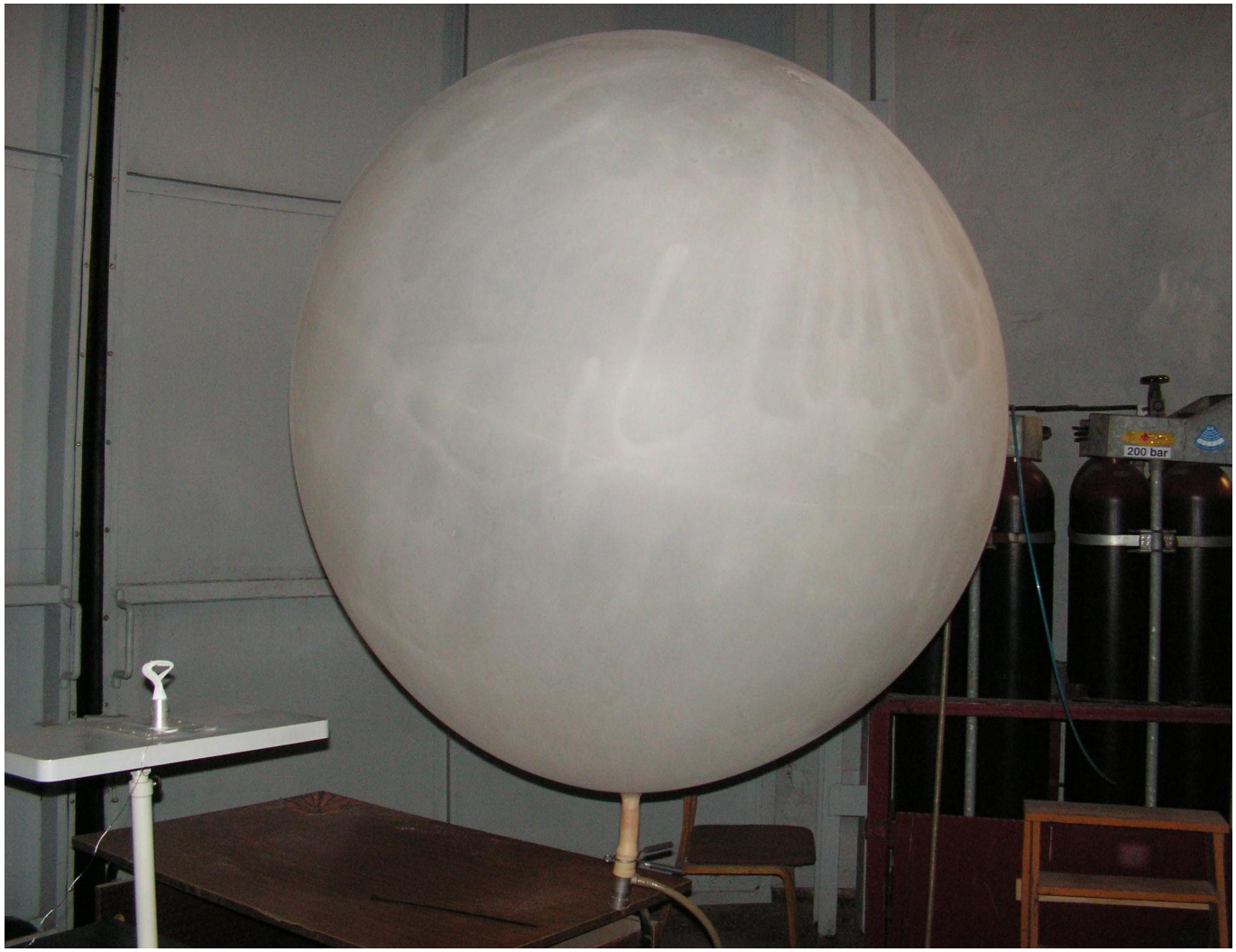
3. Аэрологический теодолит, секундомер.

4. Бланки для записи данных наблюдений.

5. Два наблюдателя.

5. Аппаратура и специализированные таблицы для обработки данных наблюдений.

Аэрологическая оболочка



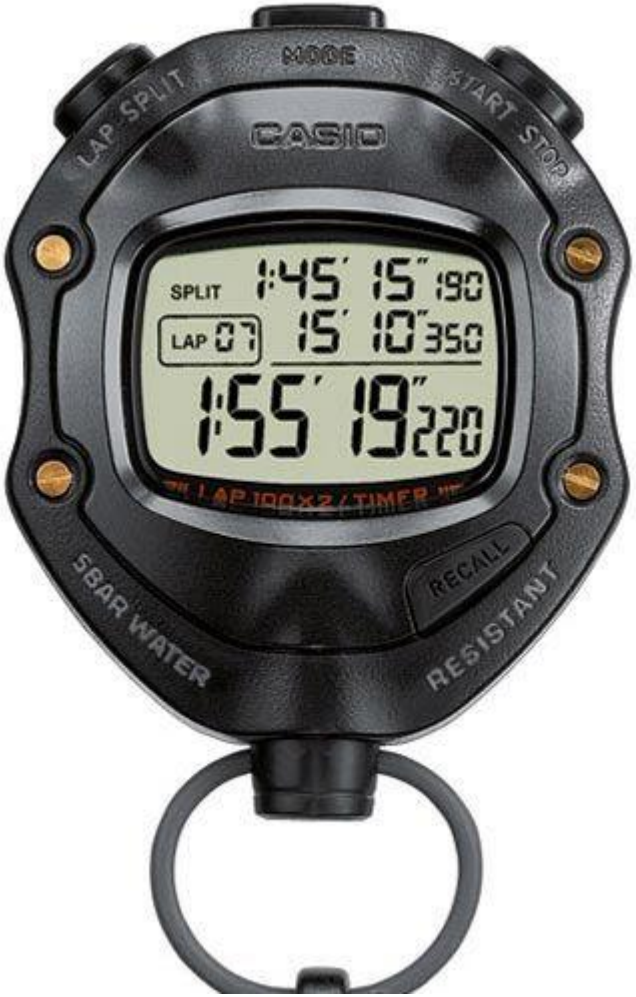
Для однопунктных и базисных шар-пилотных наблюдений используются латексные оболочки № 10, 20 и 30 (цифры указывают диаметр оболочки в ненадутом состоянии в см)

Водородонаполнительное помещение

Процесс наполнения водородом латексной оболочки

Секундомер механический СОСпр-2а

Весы электронные



Секундомер электронный

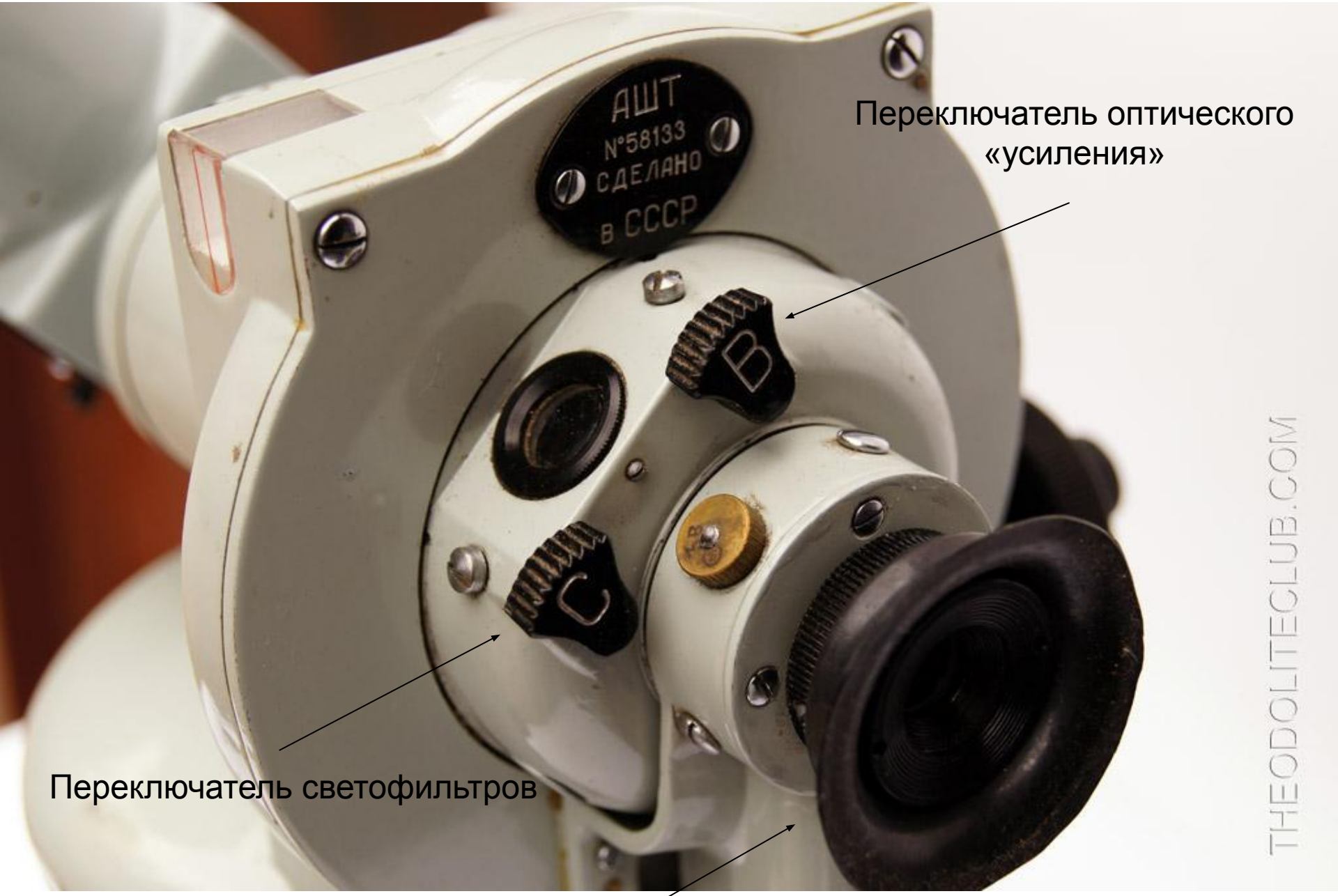
Casio HS-80TW-1E

Определение угловых координат шар-пилота с помощью аэрологического теодолита в полевых условиях

Офицерская школа морской авиации (Баку, 1915 г.)

Аэрологические теодолиты

N67
ZAUIT



Переключатель оптического «усиления»

Переключатель светофильтров

Объектив

Буссоль
Уровень
Объектив
Окуляр
Винты для горизонтирования теодалита
THEODOLITECLUB.COM

Винты для смещения объектива
при слежении за шар-пилотом
Стопорный винт для фиксации
горизонтальной шкалы после ее установки
на ноль с использованием буссоли
THEODOLITECLUB.COM

THEODOLITECLUB.COM

THEODOLITECLUB.COM

Установка теодолита.

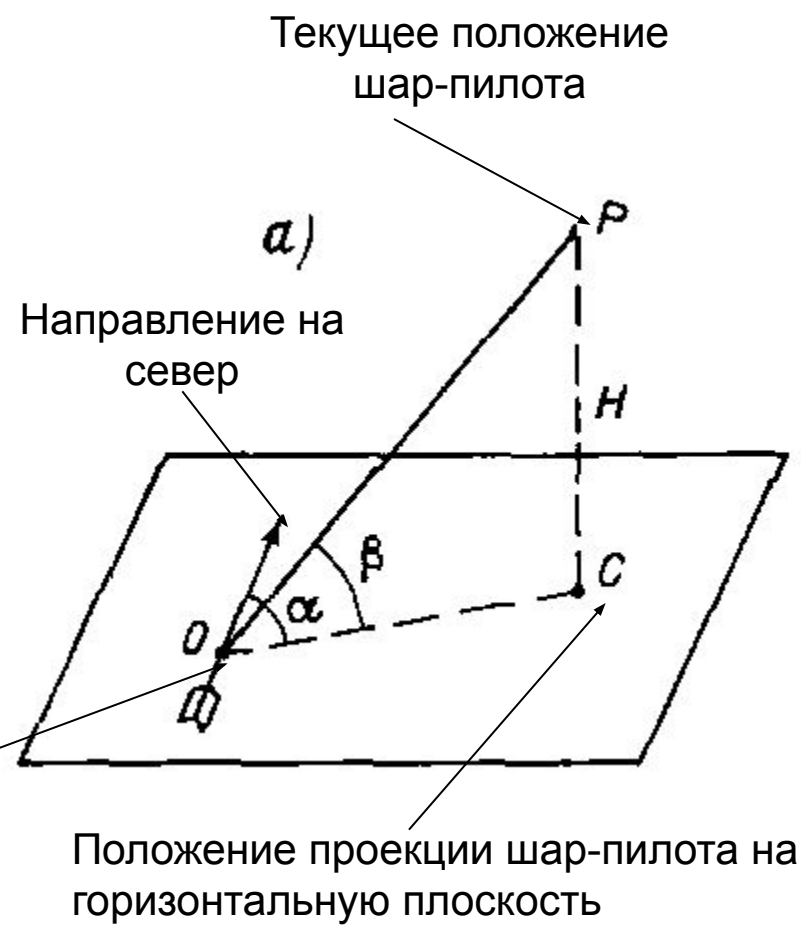
Теодолит устанавливается либо на треноге, либо на специальном стационарном постаменте, имеющем тот же винт крепления, что и тренога.

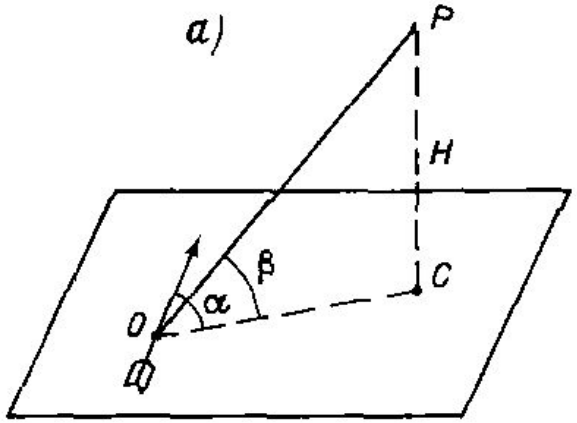
Место размещения аэрологического теодолита должно находиться вдали от высоких предметов и обеспечивать подход к теодолиту со всех сторон.

С помощью аэрологического теодолита в различные моменты времени ***t*** определяются **две** угловые координаты шар-пилота: горизонтальный угол ***α*** и вертикальный угол ***β***, а сами моменты времени, прошедшие с момента выпуска, определяются секундомером.

Горизонтальный угол отсчитывается от направления на север до линии, соединяющей точку выпуска с проекций положения щар-пилота на горизонтальную плоскость по часовой стрелке.

Вертикальный угол отсчитывается от линии, соединяющей точку выпуска с проекций положения щар-пилота на горизонтальную плоскость, до линии, соединяющей точку выпуска с ткущим положением шар-пилота.





Дискретность *обрабатываемых* моментов времени:

- через 0.5 мин с момента выпуска до 3-ей минуты включительно;

- через 1 мин с 3-ей до 10-й мин;

- через 2 мин с 10-й мин до 40 мин,

- через 4 мин с 40 мин до конца подъёма, включая последнюю минуту наблюдения.

Для контроля данные о вертикальных углах *записываются* в таблицу наблюдений после третьей минуты каждую минуту.

Погрешности шар-пилотных наблюдений

Инструментальные погрешности

Ошибки, возникающие при установке и настройке теодолита:

1. Ошибка, вызванная смещением нуля вертикального круга.

2. Ошибка, вызванная наличием угла коллимации.

3. Ошибка, связанная с неправильным горизонтированием теодолита.

4. Ошибка, связанная с неправильной ориентацией теодолита относительно географических координат.

1. Ошибка, вызванная смещением нуля вертикального круга: $\Delta\alpha$.

Для определения величины ошибки смещением нуля вертикального круга теодолит наводят на удаленный предмет и определяют вертикальный угол α_1. Затем переводят труду через зенит и снова наводят на тот же предмет и определяют второй вертикальный угол α_2. Поскольку

$\alpha_1 = \alpha_{ист} + \Delta\alpha$, а $\alpha_2 = \alpha_{ист} + 180^0 - \Delta\alpha$.

Подставляя из первого уравнения $\alpha_{ист}$ во второе уравнение, получаем

$\alpha_2 = \alpha_1 – \Delta\alpha + 180^0 – \Delta\alpha = \alpha_1 + 180^0 – 2\,\Delta\alpha$

или

$\alpha_2 = \alpha_1 + 180^0 – 2\,\Delta\alpha$.

Решая последнее уравнение относительно $\Delta\alpha$, получаем

$\Delta\alpha = (\alpha_1 – \alpha_2 – 180^0) / 2$.

После проведения измерений для получения правильного значения вертикального угла к измеренным значениям необходимо вводить поправку $\Delta\alpha$ (с соответствующим знаком), если измеренная при юстировки теодолита величина $\Delta\alpha > 0.2^0$.

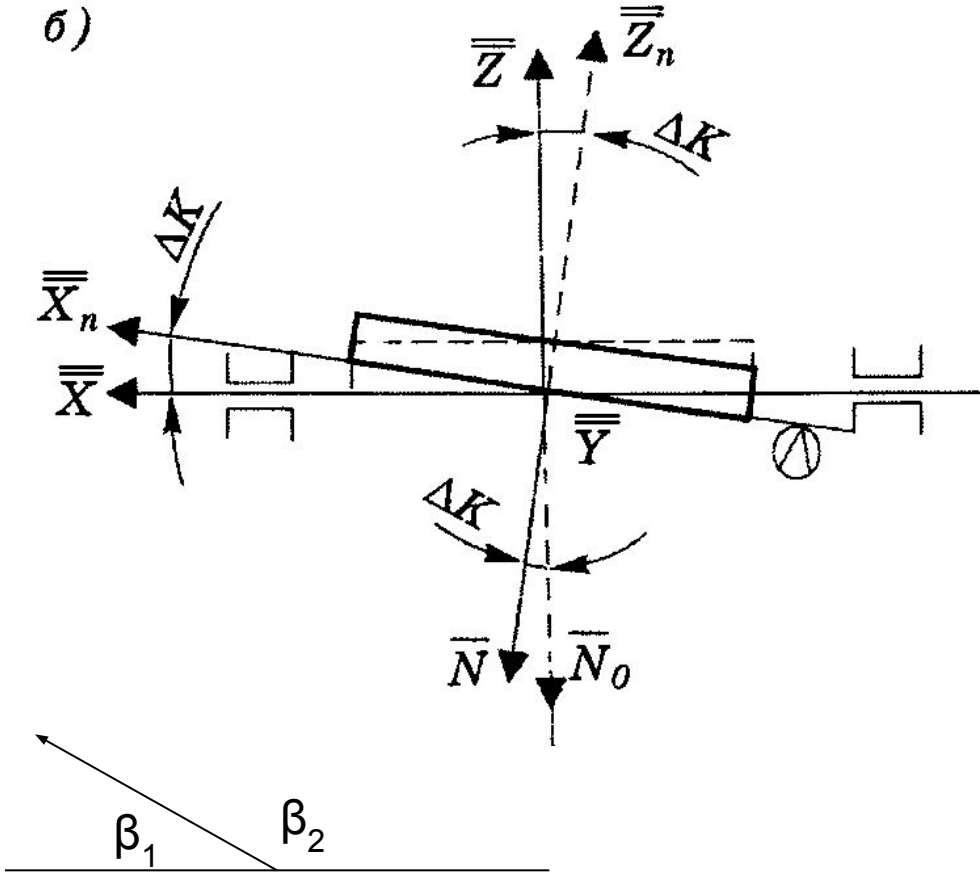
2. Ошибка, вызванная наличием угла коллимации: ΔК.

Коллимационная ошибка - инструментальная ошибка в оптических приборов, происходящая вследствие отклонения от перпендикулярности оси вращения трубы к её оптической оси.

Возникает при неправильной установке призмы внутри теодолита. Определяется путем измерения вертикально угла удаленного предмета при двух положениях вертикальной трубы: β_1 и β_2. Если

$\Delta К = [(\beta_2 + \beta_1 - 180^0) / 2] > 0.2^0$,

то теодолит бракуется.



3. Ошибка, связанная с неправильным горизонтированием теодолита.

Устраняется путем устойчивого закрепления треноги теодолита на грунте (если не используются специальные бетонные постаменты) и подстройки положения теодолита на треноге за счет вращения трех регулировочных винтов.

Регулировка продолжается до тех пор, пока при любом положении теодолита после его вращения вокруг вертикальной оси воздушный пузырек уровня остается точно по середине шкалы.

4. Ошибка, связанная с неправильной ориентацией теодолита относительно географических координат.

Данный вид ошибки возникает при ориентации теодолита по буссоли без учета магнитного склонения пункта его размещения.

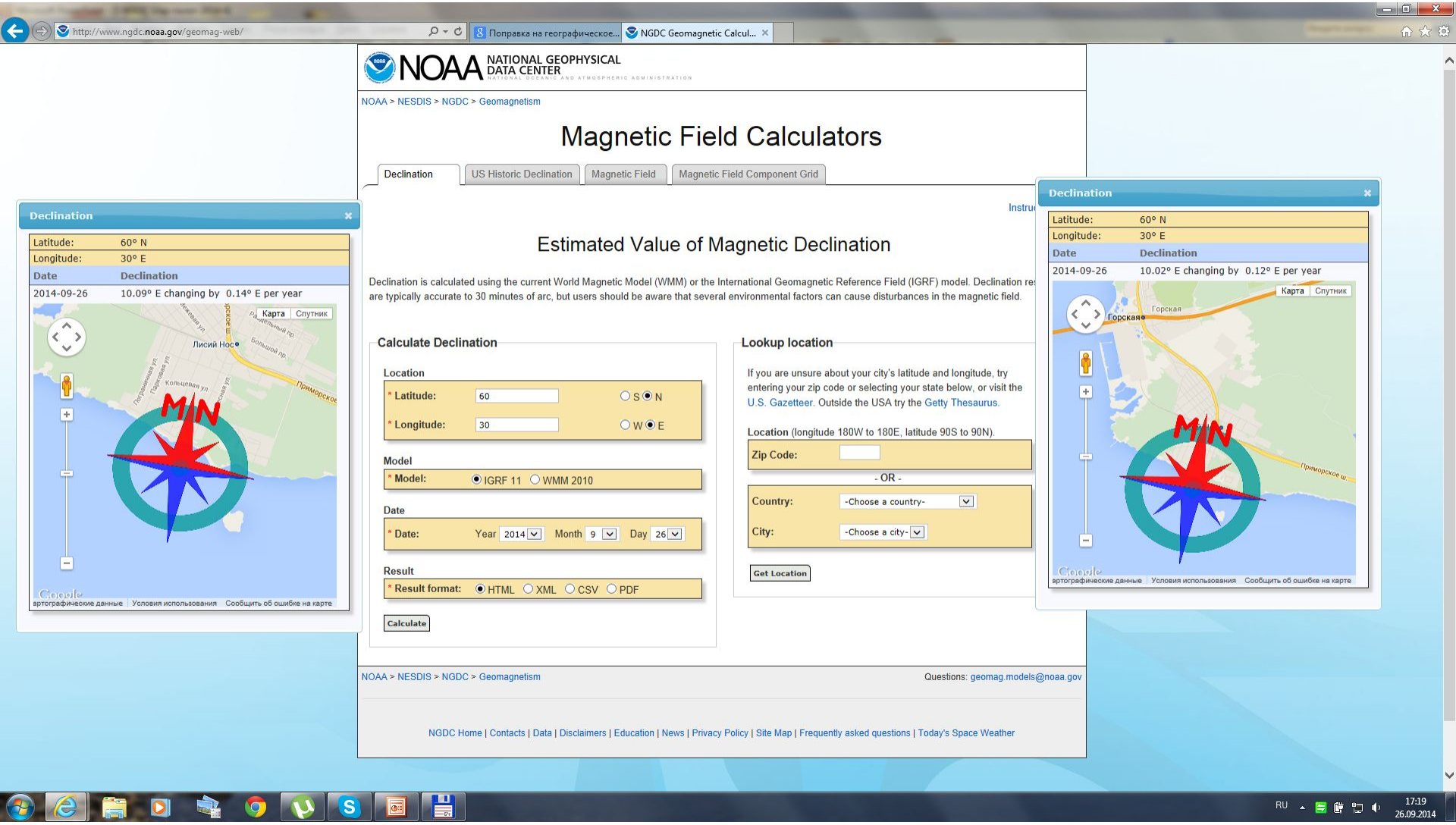
Магнитное склонение — угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки компаса отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным — если к западу.

При восточном магнитном склонении при юстировки теодолита к 0^0 горизонтальной шкалы прибавляется величина магнитного склонения, при западном – вычитается.

Для СПб (30^0 E и 60^0 N) магнитное склонение равно +10.90 E и изменяется на 0.14^0 в год к E.

Для определения величины магнитного склонения для различных географических пунктов существуют соответствующие справочники, карты и «калькуляторы» в Интернете.

Калькулятор магнитного склонения: http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/



Для СПб (30^0 ***E*** и 60^0 ***N***) магнитное склонение равно $+10.9^0$ ***E*** и изменяется на 0.14^0 в год к ***E***

При многократном проведении измерений из одного и того же места для точной ориентации теодолита можно использовать **первый способ**: меру – видимый из места установки предмет, азимут которого заранее известен. После наведения теодолита на меру устанавливают известное значение азимута и закрепляют горизонтальную шкалу стопорным винтом.

Второй способ ориентации без использования буссоли – ориентация по полярной звезде, азимут которой равен 0^0.

Третий способ – ориентация по Солнцу: в истинный полдень тень от теодолита проходит точно по меридиану. Правда, для этого необходимо знать не московское, а истинное солнечное время.

Определение **вертикальной скорости** шар-пилота

Поскольку мы живем в трехмерном мире, то для определения положения любой точки в пространстве необходимы **три координаты.**

Оптический метод пеленгации с помощью аэрологического теодолита позволяет измерить **только две координаты** (***α*** и ***β***) из трех, необходимых для:

1) задания положений шар-пилота в пространстве в разные моменты времени;

2) определения координат проекций шар-пилота на горизонтальной плоскости;

3) определения длины отрезков прямых, соединяющих эти проекций;

4) определения ориентации отрезков прямых, соединяющих эти проекций, относительно направления на север.

Недостающая **третья координата** – высота ***H***, ***рассчитывается*** по вертикальной скорости подъемы шар-пилота ***w***, которая определяется до его запуска.

При этом **предполагается**, что вертикальная скорость подъемы шар-пилота остается постоянной за все время наблюдения, что не в полной мере соответствует действительности и вносит **методическую погрешность** в определение скорости и направления ветра.

Следовательно, существенным фактором, определяющим возможность реализации оптического **<u>однопунктного</u>** шар-пилотного метода ветровых измерений в атмосфере, является возможность предварительного (до запуска шар-пилота в атмосферу) определения его вертикальной скорости движения.

Для решения этой задачи рассмотрим особенности

движения шара в вертикальной плоскости.

Эластичная оболочка шара-пилота после наполнения ее газом приобретает сферическую форму. При этом давление газа внутри оболочки лишь незначительно превышает давление окружающего воздуха.

На основании закона Архимеда наполненная газом легче воздуха оболочка будет под воздействие выталкивающей силы двигаться вверх.

В предположении, что оболочка невесома, такая выталкивающая сила, называемая **полной подъемной силой** *E,* будет равна

$$E = V(\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{Г}})$$

где *V* — объем оболочки шара-пилота; *g* — ускорение силы тяжести; ρ_B и $\rho_Г$ — плотности воздуха и газа соответственно. При 0^0С и давлении 1023 гПа $\rho_В - \rho_Г \approx 1.2$ кг/м^3 (для технического водорода).

При радиусе наполненной водородом оболочки в 30 см ее полная подъемная сила будет составлять около 135 г.

Так как оболочка имеет вес *B*, то **свободная подъемная сила** *A*, действующая на неё вверх, будет равна:

$$A = E - B = V(\rho_В - \rho_Г) - B.$$

Свободная подъемная сила оболочки определяется во время ее наполнения водородом по **величине поднимаемого грузика** и, следовательно, **известна**.

Второй силой, которая будет действовать на оболочку и которая будет направлена вниз, является сила лобового сопротивления *F,* величина которой определяется следующим соотношением:

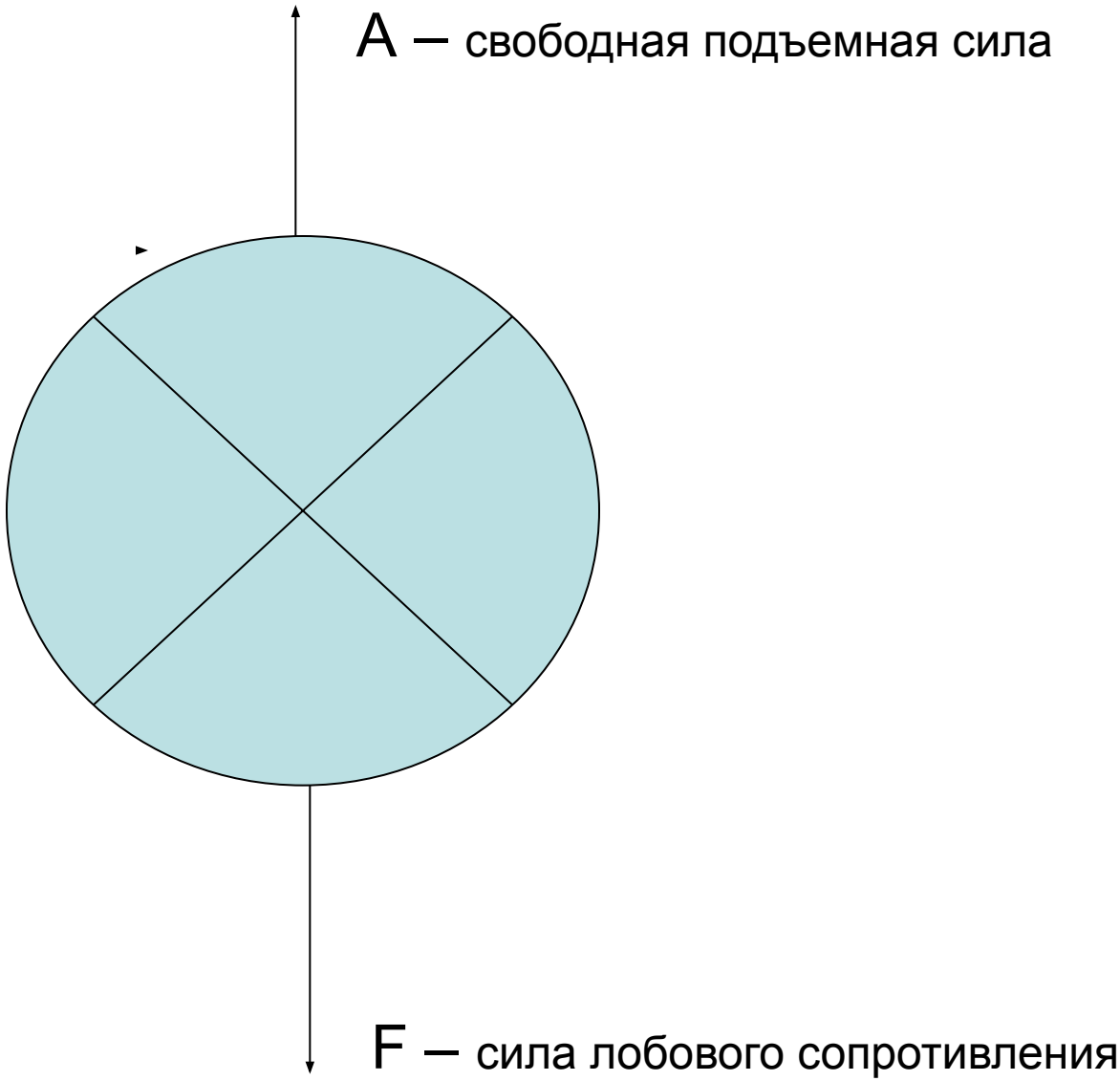
$$F = k\,q\,S,$$

где k — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы оболочки и режима обтекания шара воздушным потоком, q — динамическое давление, испытываемое шаром со стороны обтекающего потока, S — площадь поперечного сечения шара.

В процессе полета шар-пилота A ≈ F

$$A = V(\rho_В - \rho_Г) - B$$

$$F = k\,q\,S$$



В случае, если оболочка имеет сферическую форму,

$$S = \pi D^2 /4 \quad \text{и} \quad q = \rho_В w^2 / 2,$$

где D — диаметр шара, w – вертикальная скорость движения шар-пилота.

Теперь выражение для F можно записать в виде:

$$F = k\, q\, S,$$

$$F = \frac{k\pi}{8} \rho_B D^2 w^2.$$

Эксперименты показали, что практически сразу же после выпуска шар поднимается равномерно, т.е. происходит установившееся движение, при котором обе силы уравновешиваются и, следовательно, $A = F$. Подставляя в последнем уравнении F вместо A, получаем:

$$A = \frac{k\pi}{8} \rho_B D^2 w^2.$$

Разрешая последнее выражение относительно w, получаем

$$w = \sqrt{\frac{8}{k\pi}} \sqrt{\frac{A}{\rho_B}} \frac{1}{D}.$$

Для расчета ***w*** по этой формуле необходимо знать коэффициент лобового сопротивления оболочки k, плотность воздуха ρ, свободную подъемную силу оболочки A и ее диаметр D.

Более удобной для расчета вертикальной скорости шара-пилота *W*(м/мин) является следующая формула

$$W = C\frac{\sqrt{A}}{\sqrt[3]{A + B}} * \sqrt{\frac{p_0(t+273)}{293p}}$$

где *C* - коэффициент, зависящий от грузоподъемности (свободной подъемной силы) оболочки *A*; *B* - вес оболочки; p_O - давление на уровне моря по стандартной атмосфере; *p* и *t* – атмосферное давление и температура воздуха у поверхности Земли в момент выпуска шара-пилота.

Напомним, что:

- свободная подъемная сила шара-пилота ***A*** измеряется в процессе наполнения оболочки газом с помощью подвешенного к ней грузика,

- вес оболочки ***B*** определяется путем взвешивания оболочки до ее наполнения водородом.

ρ

На практике при проведении однопунктных шар-пилотных наблюдений для расчета вертикальной скорости подъема ***w*** используются специальные таблицы, приведенные в «Практикуме по аэрологи». Определение величины w производится в два этапа:

1. Сначала по таблицам приложения 2 «Практикуме по аэрологи» определяется не исправленная на текущую плотность воздуха величина w_0.

2. Затем по таблице в приложении 1 «Практикуме по аэрологи» определяют поправочный множитель, учитывающий отличие текущих условий от стандартных. После перемножения w_0 на поправочный множитель получают искомую вертикальную скорость подъема шар-пилота w.

Таблица вертикальных скоростей шаропилотов по данным свободной подъемной силы *A* и веса оболочки *q* для оболочки № 10

A	Вес оболочки, г										
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
10	95	92	90	88	86	83	82	80	79	77	76
12	101	99	97	94	92	90	88	86	85	83	81
14	106	104	102	99	97	95	93	92	90	88	87
16	111	108	106	104	101	99	98	96	94	93	91
18	114	112	110	108	105	103	102	100	99	97	96
20	118	116	114	111	109	107	106	104	102	101	99
22	121	119	117	115	112	110	109	107	106	104	103
24	124	122	120	118	116	114	112	111	109	108	106
26	126	124	123	121	119	117	115	114	112	111	109
28	129	127	125	123	122	119	118	116	115	113	112
30	131	130	128	126	124	122	120	119	118	116	114
32	134	132	130	128	126	124	123	121	120	118	117
34	136	134	132	130	128	126	125	124	122	121	119
36	138	136	134	132	131	129	127	126	124	123	122
38	139	138	136	134	132	130	129	128	127	125	124
40	141	139	138	136	134	132	131	130	129	127	126

Таблица вертикальных скоростей шаропилотов по данным свободной подъемной силы *A* и весу оболочки *q* для оболочки № 20

A	Вес оболочки, г					
	30	32	34	36	38	40
102	162	162	161	160	159	159
104	163	162	162	161	160	159
106	164	163	162	162	161	160
108	165	164	163	162	161	161
110	165	165	164	163	162	162
112	166	165	164	164	163	163
114	167	166	165	164	164	163
116	167	166	166	165	164	164
118	168	167	166	166	165	164
120	168	168	167	166	166	165
122	169	168	168	167	166	166
124	170	169	168	168	167	166
126	170	170	169	168	168	167
128	171	170	170	169	168	168
130	172	171	170	170	169	168
132	172	172	171	171	170	169
134	173	172	172	171	171	170
136	174	173	172	172	171	171
138	174	174	173	173	172	171
140	175	174	174	173	173	172
142	176	175	175	174	173	173
144	177	176	176	175	174	174
146	178	177	176	176	175	174
148	178	178	177	176	176	175
150	179	178	178	177	177	176
152	180	179	179	178	178	177
154	181	180	180	179	178	178
156	182	181	180	180	179	179
158	183	182	182	181	180	180
160	184	183	183	182	181	181

ρ

A	Вес оболочки, г					
	30	32	34	36	38	40
162	185	184	184	183	182	182
164	186	185	185	184	183	183
166	187	186	186	185	184	184
168	188	188	187	186	186	185
170	189	189	188	188	187	186
172	191	190	190	189	188	188
174	192	192	191	190	190	189
176	194	193	192	192	191	191
178	195	194	194	193	193	192
180	196	196	195	194	194	193
182	198	197	197	196	196	195
184	200	199	198	198	197	196
186	201	201	200	200	199	198
188	203	202	202	201	201	200
190	205	204	204	203	202	202
192	206	206	205	204	204	203
194	208	207	207	206	205	205
196	210	209	208	208	207	207
198	211	211	210	210	209	208
200	213	212	212	211	211	210
202	215	214	214	213	213	212
204	217	216	216	215	214	214
206	218	218	217	217	216	216
208	220	219	219	218	218	217
210	221	220	220	220	219	218
212	222	222	221	220	220	219
214	223	223	222	221	221	220
216	224	223	223	222	222	221
218	225	224	224	223	222	222
220	225	224	224	223	223	222
222	226	225	224	224	223	223
224	226	226	225	225	224	224
226	227	226	226	225	225	224
228	228	227	227	226	226	225
230	228	227	227	226	226	225

ρ

Таблица вертикальных скоростей шаропилотов по данным свободной подъемной силы A и весу оболочки q для оболочки № 30

A	Вес оболочки, г					A	Вес оболочки, г				
	70	75	80	85	90		70	75	80	85	90
102	149	148	146	145	143	196	199	198	196	195	194
104	150	148	147	146	144	198	200	199	198	197	196
106	150	149	148	146	145	200	202	201	200	198	197
108	151	150	149	148	146	202	204	202	201	200	199
110	152	151	150	148	147	204	205	204	203	201	200
112	153	152	150	149	148	206	206	205	204	203	201
114	154	152	151	150	149	208	207	206	205	204	203
116	154	153	152	151	150	210	209	208	206	205	204
118	155	154	153	152	150	212	210	209	207	206	205
120	156	155	153	152	151	214	211	210	208	207	206
122	156	155	154	153	152	216	212	211	210	208	207
124	157	156	155	154	152	218	213	212	210	209	208
126	158	157	156	154	153	220	214	213	211	210	209
128	159	158	156	155	154	224	216	214	213	212	210
130	160	158	157	156	154	228	217	216	215	213	212
132	160	159	158	156	155	232	218	217	216	215	213
134	161	160	158	158	156	236	220	218	217	216	215
136	162	160	159	158	157	240	221	220	218	217	216
138	163	161	160	159	157	244	222	221	219	218	217
140	163	162	161	159	158	248	223	221	220	219	218
142	164	163	162	160	159	252	223	222	221	220	218
144	165	164	162	161	160	256	224	223	222	221	219
146	166	164	163	162	161	260	225	224	223	221	220
148	167	165	164	163	162	264	225	224	223	222	221
150	167	166	165	164	163	268	226	225	224	223	222
152	168	167	166	165	164	272	227	226	225	224	222
154	169	168	167	166	165	276	228	227	225	224	223
156	170	169	168	167	166	280	228	227	226	225	224
158	171	170	169	168	167	284	229	228	227	226	225
160	172	171	170	169	168	288	230	229	228	227	226
162	173	172	171	170	169	292	230	230	229	228	226
164	174	173	172	171	170	296	231	230	229	228	227
166	176	174	173	172	171	300	232	231	230	229	228
168	177	176	175	174	172	304	233	232	231	230	229
170	178	177	176	175	174	308	233	232	231	230	230
172	180	178	177	176	175	312	234	233	232	231	230
174	181	180	179	177	176	316	235	234	233	232	231
176	182	181	180	179	178	320	236	235	234	233	232
178	184	182	181	180	179	324	236	235	234	233	233
180	185	184	183	182	181	328	237	236	235	234	233
182	187	186	184	183	182	332	238	237	236	235	234
184	189	187	186	185	184	336	239	238	237	236	235
186	190	189	188	187	186	340	239	238	237	236	235
188	192	191	190	188	187	344	240	239	238	237	236
190	194	192	191	190	189	348	241	240	239	238	237
192	194	192	191	190	190	352	241	240	239	238	237
194	197	196	195	194	192						

ρ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Поправочный множитель $\sqrt[6]{\frac{\rho_0}{\rho}}$ для расчета свободной подъемной силы шаропилота при наполнении его до стандартной вертикальной скорости по весу оболочки (по таблицам приложения 1) и для исправления нестандартной вертикальной скорости, полученной по свободной подъемной силе шара и весу оболочки (по таблицам приложения 2)

Температура, °С	Давление, гПа										
	1067	1040	1013	987	960	933	907	880	853	827	800
—50	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
—40	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
—30	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
—20	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,02
—10	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02
0	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03
10	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03
20	0,99	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04
30	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05
40	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05
50	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06

Погрешности шар-пилотных наблюдений

Методические погрешности

Отклонение фактической вертикальной скорости от расчетной:

1. Из-за уменьшения плотности воздуха с высотой, что приводит к возрастанию вертикальной скорости в соответствие с соотношением

$$\frac{w_H}{w_0} = \frac{\sqrt[6]{\rho_{возд_H}}}{\sqrt[6]{\rho_{возд_0}}}$$

H, км	0	4	8	10
w_H / w_0	1	1.08	1.15	1.20

2. Из-за диффузии газа через оболочку (можно пренебречь).

3. Из-за увеличения с высотой разности давления между наружным воздухом и газом в оболочке (появление сверхдавления внутри шара) на высотах более 10 км, что приводит к увеличению вертикальной скорости подъема.

4. Из-за наличия разности температур между наружным воздухом и газом в оболочке: если $t_{возд} > t_{газа}$, то это приводит к уменьшению свободной подъемной силы оболочки, и наоборот (проявляется при прохождении шар-пилотом мощных инверсионных слоев).

5. Из-за отклонения формы шара от сферической (изменяется коэффициент лобового сопротивления).

6. Из-за наличия в атмосфере турбулентности и вертикальных потоков.

Методика определения вертикального профиля скорости и направления ветра

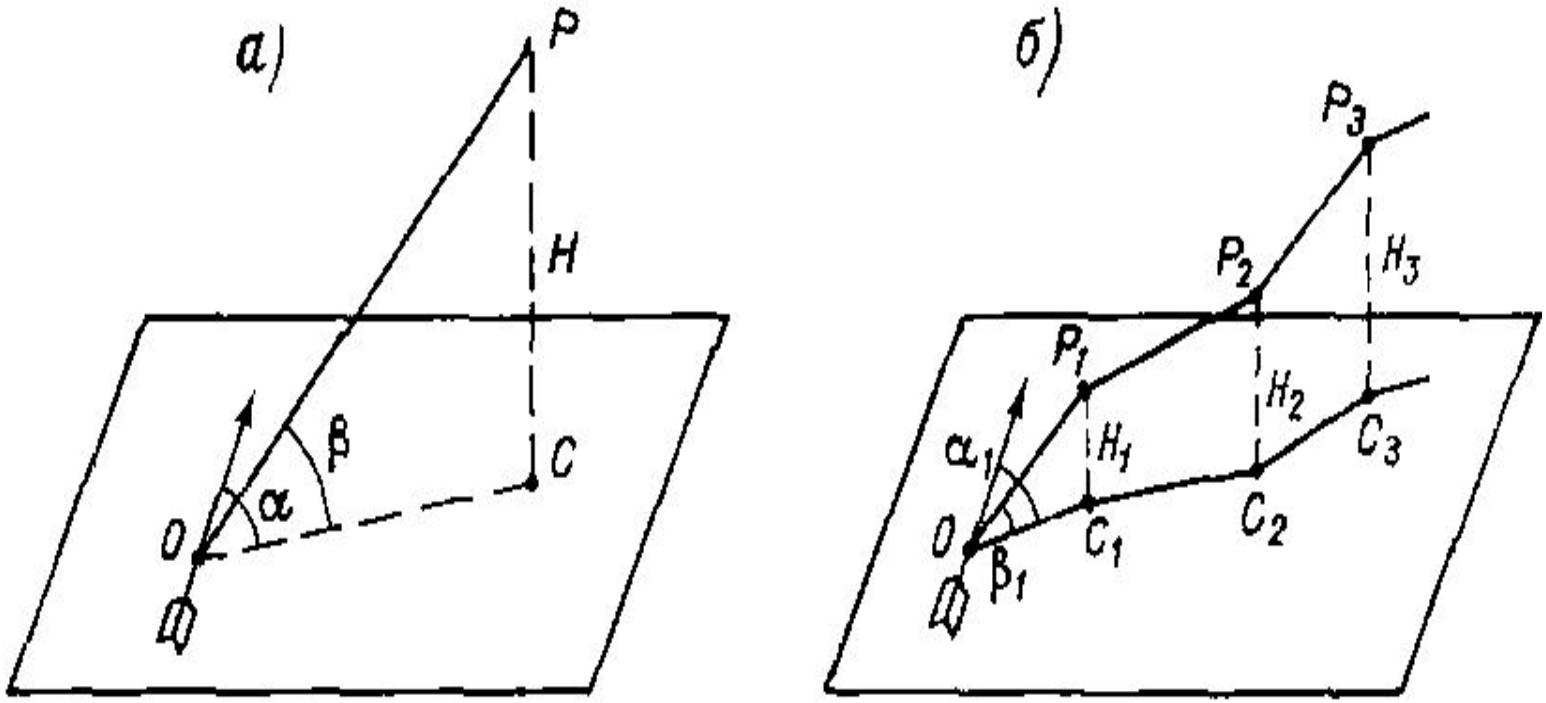
Основные предположения:

1. Шар-пилот полностью увлекается воздушным горизонтальным потоком.

2. Вертикальная скорость подъема шар-пилота может быть определена на основе измерения веса оболочки и ее свободной подъемной силы.

3. Вертикальная скорость подъема шар-пилота не меняется с высотой.

Схема однопунктных шар-пилотных наблюдений



P_1, P_2, P_3 – положение шар-пилота в моменты времени t_1, t_2,t_3;

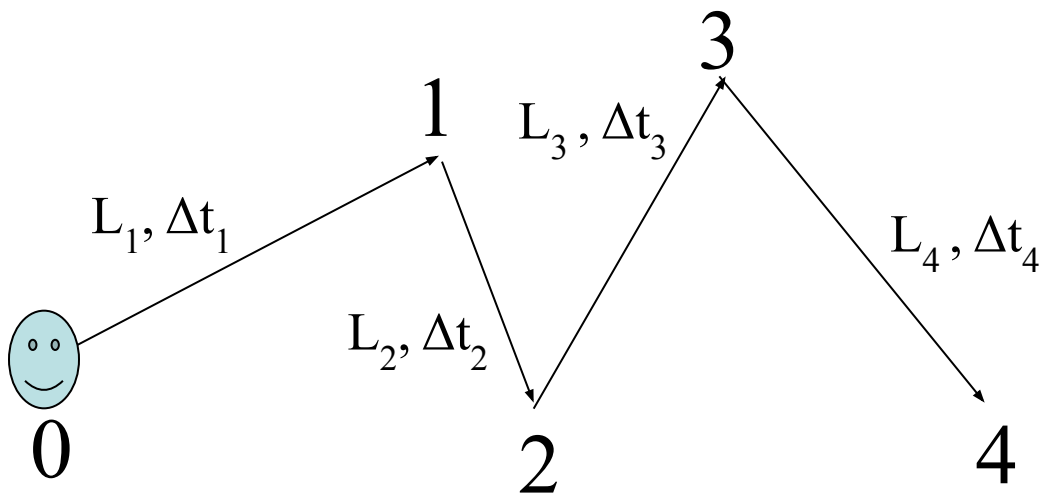
C_1, C_2, C_3 – положение проекций шар-пилота на горизонтальную плоскость;

H_1, H_2,H_3 – высота подъёма шар-пилота;

угол α - азимут (горизонтальный), угол β - вертикальный

Основные теоретические положения

Принцип измерения будет понятен, если мы представим себе биллиардный шар, который катится по горизонтальной поверхности стола, сталкиваясь с другими шарами. Требуется определить скорость его перемещения между столкновениями, зная L_i и Δt_i: $\mathbf{V_i = L_i / \Delta t_i}$ **.**



Направление ветра отсчитывается:

- **от направления на север;**
- **по часовой стрелки;**
- **до вектора, который указывает *откуда* дует ветер.**

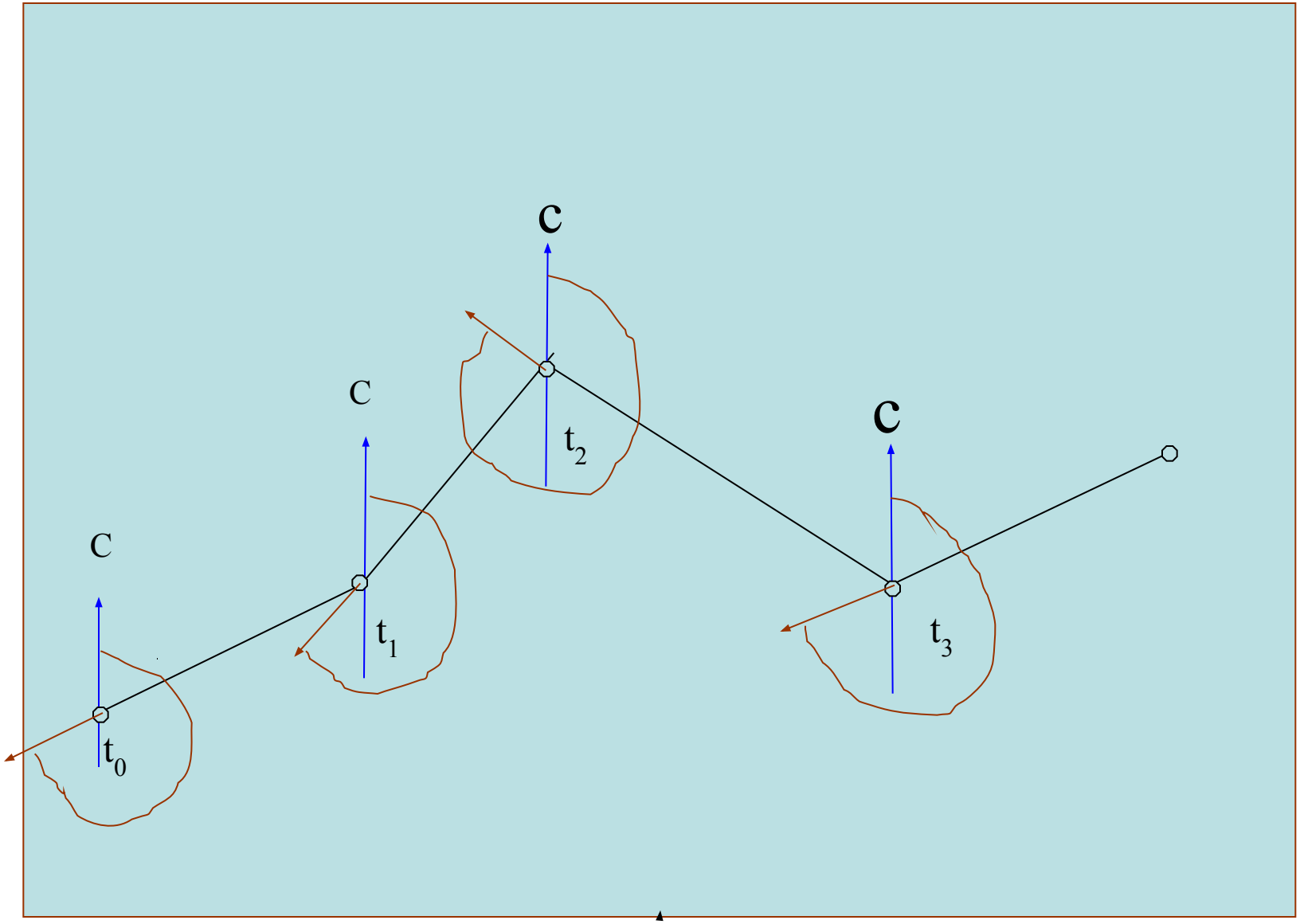


Схема определения направления ветра при проведении шар-пилотных наблюдений.

Подготовка к обработке данных шар-пилотных наблюдений:

1. Расчет вертикальной скорости подъема шар-пилота ***w.***

2. Расчет высоты подъема шар-пилота *H.*

ρ

Расчет высоты шар-пилота

Высоту H можно определить, если известны вертикальная скорость шар-пилота w и время Δt, прошедшее с момента выпуска шар-пилота:

$$H = w \cdot \Delta t \, .$$

Вертикальная скорость шар-пилота определяется перед выпуском шар-пилота, а время – по секундомеру.

Практически определение вертикальной скорости шар-пилота значительно упрощается с помощью специальных таблиц, учитывающие еще и поправки на изменение плотности воздуха с изменением температуры.

Дискретность обработки данных шар-пилотных наблюдений

Дискретность обрабатываемых моментов времени:

- через 0.5 мин до 3-ей минуты включительно;

- через 1 мин с 3-ей до 10-й мин;

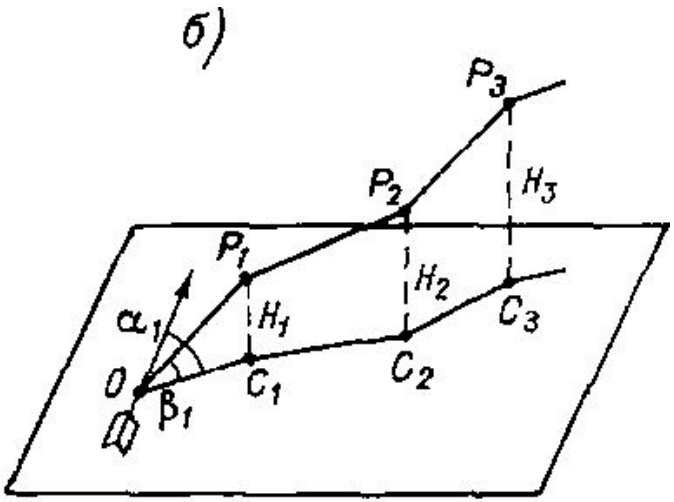
- через 2 мин с 10-й мин до 40 мин,

- через 4 мин с 40 мин до конца подъёма, включая последнюю минуту наблюдения.

Особенность использования метода оптических шар-пилотных наблюдений заключается в том, что с его помощью могут быть рассчитаны лишь **осредненная** в слоях атмосферы скорость и направление ветра.

Толщина каждого такого слоя определяется вертикальной скоростью перемещения объекта и интервалами времени между смежными отчетами.

В дальнейшем эти значения рассматриваются как скорость и направления ветра на высотах, соответствующие высоте середины соответствующих слоев.



$$\overline{H}_1 = \frac{H_1}{2} = \frac{P_1C_1}{2} = \frac{w\,\Delta t_1}{2}$$

$$\overline{H}_2 = \frac{H_2 - H_1}{2} = \frac{P_2C_2 - P_1C_1}{2} = \frac{w\,\Delta t_2}{2}$$

$$\overline{H}_2 \neq \frac{H_2}{2}\,!$$

Существуют графический и аналитический методы обработки данных шаропилотных наблюдений.

Первоначально наибольшее развитие в оперативной практике получил графический метод, который обладает достаточной простотой и наглядностью. Однако графический метод не обеспечивает достаточной точности обработки исходных данных, поскольку при реализации графического метода часто возникают ошибки как субъективного, так и методического характера.

От указанных недостатков графического метода свободен аналитический метод обработки данных шаропилотных наблюдений.

Учитывая преимущества и недостатки этих двух методов рассмотрим последовательно их реализацию.

Графический метод

Графический метод обработки данных однопунктных шар-пилотных наблюдений состоит из двух этапов.

Этап 1. Построение положений проекций шар-пилота на горизонтальной поверхность в разные моменты времени.

Этап 2. Последовательное использование положений двух соседних пар проекций для определения скорости и направления ветра.

Если в некоторый момент времени известны: высота шар-пилота ***H***, вертикальный угол ***β*** и горизонтальный угол ***α***, то для построения положения проекции шара на горизонтальную плоскость сначала находим его удаление от места выпуска ***L***:

$$L = H \, ctg \, \beta.$$

Получаем окружность с радиусом ***L***, в некоторой точке которой и будет находиться искомая проекция. Для нахождения положения этой точки на построенной окружности отложим от направления на север по часовой стрелке горизонтальный угол ***α*** и под этим углом проведем линию от центра до пересечения с окружностью радиуса ***L*** . Точка пересечения и будет положение искомой проекции.

Этап 1.

После построения положения двух последовательных проекции шара на горизонтальную плоскость (на рисунке – точки 1 и 2) (на рисунке – точки 1 и 2) определяются скорость и направление ветра.

Этап 2а.

После построения положения двух последовательных проекции шара на горизонтальную плоскость определяются скорость и направление ветра.

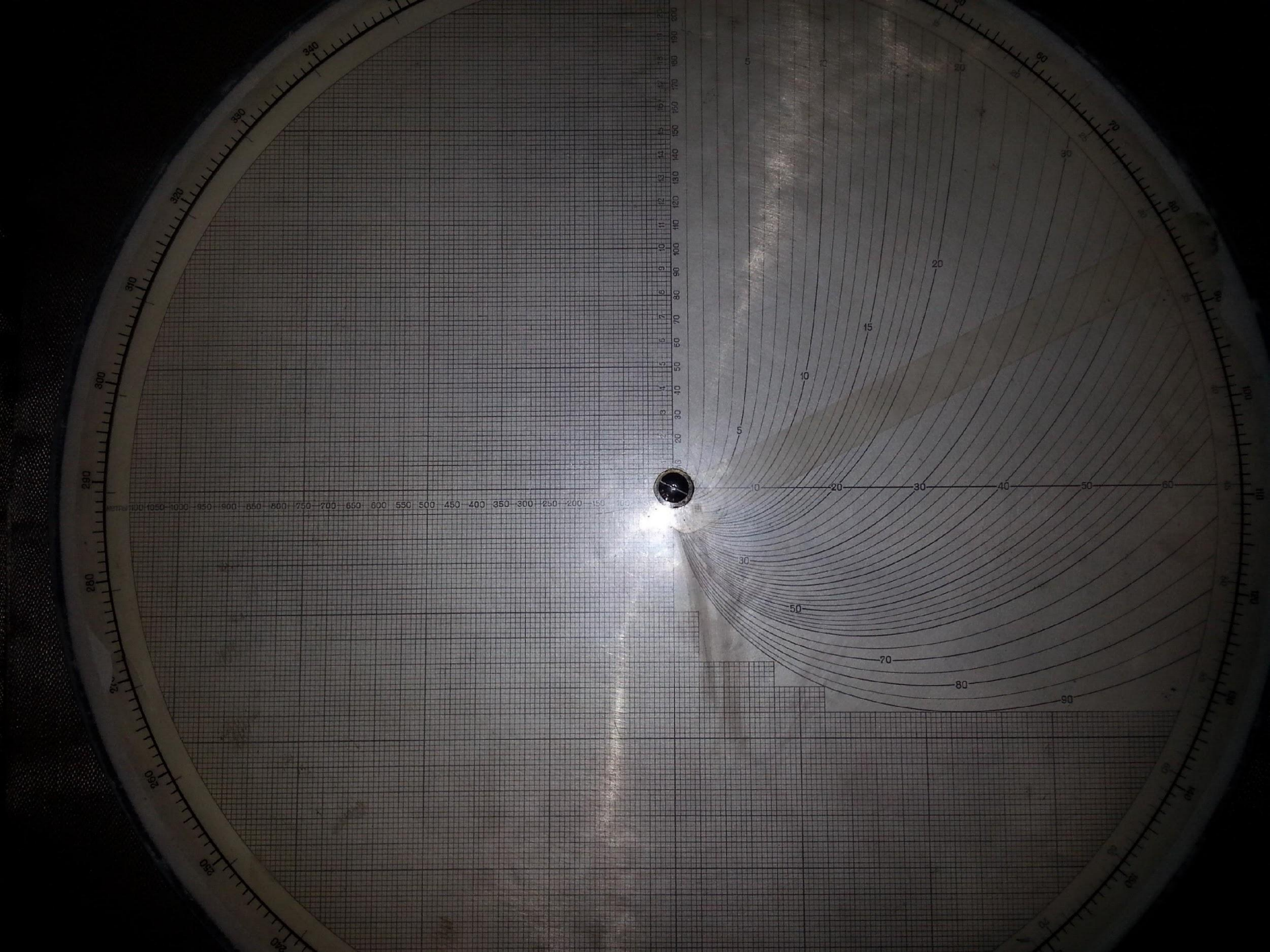
Этап 2б.

Для графического определения скорости и направления ветра на высотах по результатам шаропилотных наблюдений используется **круг Молчанова** (синоним: аэрологический планшет А-30).

Этот прибор состоит из:
- металлического неподвижного диска, на одной из сторон которого отпечатана номограмма,
- прозрачного целлулоидного круга, который вращается около центра неподвижного круга,
- подвижной линейки, вращающейся вокруг центра круга.

На прозрачном круге с помощью номограммы строится **горизонтальная проекция шара-пилота**, по которой определяются скорость и направление ветра.

Внешний вид круга Молчанова (аэрологический планшет А-30).


5
10
15
20
30
50
70
80
90
10
20
30
40
50
60

1000
950
900
850
800
750
700
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50

Аналитический метод

Более точными, естественно, являются аналитические методы обработки, использование которых в оперативной практике возможно лишь при использовании компьютерной техники. Применение компьютерной техники в то же время позволяет архивировать исходные данные и результаты расчетов, упростить процесс представления информации и передачи ее потребителям, повысить культуру труда .

Алгоритм обработки данных однопунктных шар-пилотных наблюдений

$$H_i = W\, t_i$$

$$x_i = H_i\, ctg\, \beta_i \cos\alpha_i$$

$$y_i = H_i\, ctg\, \beta_i \sin\alpha_i$$

$$V_{i,i-1}(м/с) = \frac{\sqrt{\Delta x_{i,i-1}{}^2 + \Delta y_{i,i-1}{}^2}}{60\,\Delta t_{i,i-1}} \quad \Delta x_{i,i-1} = x_i - x_{i-1} \quad \Delta y_{i,i-1} = y_i - y_{i-1} \quad \Delta t_{i,i-1} = t_i - t_{i-1}$$

$$a_{i,i-1} = arc\,tg \left| \frac{\Delta y_{i,i-1}}{\Delta x_{i,i-1}} \right|$$

$$d_i = \begin{cases} 180^0 + a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} > 0,\ \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} < 0,\ \Delta y_{i,i-1} < 0 \\ 360^0 - a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} < 0,\ \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ 180^0 - a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} > 0,\ \Delta y_{i,i-1} < 0 \end{cases}$$

Пример заполнения таблицы при аналитическом расчете скорости и направления ветра

T, мин	*α, ^{0}*	*β, ^{0}*	*H, м*	*x*	*y*	*V, м/с*	*Δx*	*Δy*	*a*	*d, ^{0}*
0.5	159.5	47.7	100	-85.3	31.9	3.0	-85.3	31.9	20.5	340
1.0	155.5	47.2	200	-168.5	75.9	3.1	-83.2	44.0	27.9	332
1.5	158.0	47.2	300	-258.4	102.8	3.1	-89.9	26.9	16.7	343
2.0	157.0	49.0	400	-310.1	135.6	2.3	-61.7	32.8	28.0	332
2.5	157.0	47.7	500	-419.1	177.5	3.6	-99.0	41.9	22.9	337
3.0	164.5	45.5	600	-568.7	159.3	5.0	-149.6	-18.2	6.9	7
4.0	164.3	43.8	800	-803.5	225.3	4.1	-234.8	66.0	15.7	353
5.0	169.0	43.9	1000	-1020.3	197.4	3.6	-216.8	-27.9	7.3	7
6.0	172.0	45.8	1200	-1155.9	163.3	2.3	-135.6	-34.1	14.1	14

Пример обработки данных однопунктных шар-пилотных наблюдений

$H_i = W\, t_i$ W=200 м/мин; H_1=200 0.5 =100м; H_2=200 1.0 =200м;

$$x_i = H_i\, ctg\, \beta_i \cos\alpha_i$$

X_1=100 *ctg* (47.7) *cos* (159.5) = 100 0.91 (-0.937) = -85.3

X_2 = 200 *ctg* (47.2) *cos* (155.5) = 200 0.926 (-0.91) = -168.5

$$y_i = H_i\, ctg\, \beta_i \sin\alpha_i$$

Y_1 = 100 *ctg* (47.7) *sin* (159.5) = 100 0.91 0.35 = 31.9

y_2 = 200 ctg (47.2) *sin* (155.5) = 200 0.926 0.41 = 75.9

$$V_{i,i-1}\,(м/с) = \frac{\sqrt{\Delta x_{i,i-1}{}^2 + \Delta y_{i,i-1}{}^2}}{60\,\Delta t_{i,i-1}}$$

$V_{1,0}$ = [$(-85.3 - 0)^2 + (31.9 - 0)^2$] / [60 (0.5 - 0)] = 3.0

$V_{2,1}$ = [$(-168.5 + 85.3)^2 + (75.9 – 31.9)^2$] / [60 (1 - 0.5)] = 3.1

$$a_{i,i-1} = arctg\left|\frac{\Delta y_{i,i-1}}{\Delta x_{i,i-1}}\right|$$

$A_{1,0}$ = *arc tg* l [(31.9 - 0) / (-85.3 - 0)] = 20.5; Δx <0; Δy>0

$A_{2,1}$ = *arc tg* l [(75.9 – 31.9) / (-168.5 + 85.3)] = 27.9; Δx <0; Δy>0

$$d_i = \begin{cases} 180^0 + a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} > 0,\ \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} < 0,\ \Delta y_{i,i-1} < 0 \\ 360^0 - a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} < 0,\ \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ 180^0 - a_{i,i-1} & если\ \Delta x_{i,i-1} > 0,\ \Delta y_{i,i-1} < 0 \end{cases}$$

$D_{1,0}$ = 360 – 20.5 = 239.5

$D_{2,1}$ = 360 – 27.9 = 232.1

Представление данных однопунктных шар-пилотных наблюдений

Полученные значения скорости и направления ветра, отнесенные к высотам середины слоев над уровнем моря, наносят на график, который строится в масштабе: по вертикали - 1 см ~ 1 км; по горизонтали - 1 см ~ 2м/с, 1 см ~ 10^0.

Первой точкой на графиках наносится данные о скорости и направлении ветра на уровне станции.

В слое до 3-х км строят дополнительный график зависимости направления ветра от высоты в масштабе по вертикали 1 см - 200 м,
по горизонтали 1 см – 10^0.

Все нанесенные точки соединяют прямыми

линиями (кусочно-линейная интерполяция).

Полученные значения скорости и направления ветра записывают в соответствующие графы бланка КАЭ-3 в строку, соответствующую концу обрабатываемого интервала времени, т. е. моменту времени t_i.

Осуществляют привязку полученных ветровых характеристик к высоте. При этом найденные значения скорости и направления ветра относят к высоте середины слоя, пройденному радиозондом за соответствующий интервал времени.

Высота середины слоя определяется по построенному графику H(t) для момента времени, равному среднему значению из двух соседних обрабатываемых моментов времени.

Найденные значения высот записывают в графу “Высота середины слоя над уровнем моря” бланка КАЭ-3, графу “Высота середины слоя над поверхностью земли” заполняется до высоты 1000 м, вычитая из высоты середины слоя над уровнем моря высоту станции.

Расчет скорости и направления ветра для стандартных уровней производится по стандартным формулам линейной интерполяции.

С построенных графиков снимают значения скорости и направления ветра на стандартных высотах, изобарических поверхностях, высотах особых точек, уровнях наибольшей скорости ветра и максимальной скорости ветра.

В основу критерия для выбора особых точек ветра положена возможность восстановления по этим точкам кривой изменения с высотой направленияветра с точностью до 10^0, скорости ветра до 5 м/с.

Особыми точками ветра являются начальная и конечная высота подъема, уровень максимальной скорости ветра, границы пропуска в наблюдениях. Уровнем максимального ветра считается слой атмосферы выше изобарической поверхности 500 гПа (5500 м) где наблюдается скорость ветра превышающая 30 м/с и изменение скорости в двух километровом слое выше или ниже больше 10 м/с.

Дополнительно на построенных кривых изменения ветра с высотой намечают предполагаемые особые точки, где наблюдается значительный излом кривых.

Затем последовательно, в порядке возрастания высоты, исследуют каждую предполагаемую особую точку. Для этого соединяют прямой две соседние с исследуемой точки: нижележащую, уже выбранную особую точку, и вышележащую предполагаемую особую точку. На этой прямой на уровне исследуемой точки определяют линейно интерполированное

значение скорости или направления ветра.

Исследуемую точку включают в число особых, если:

линейно интерполированное значение скорости ветра отличается от действительного более чем на 5 м/с;

линейно интерполированное значение направления ветра отличается от действительного более чем на 10^0.

Найденные значения скорости и направления ветра на стандартных высотах, стандартных изобарических поверхностях, высотах особых точек записывают в соответствующие графы бланка КАЭ-3а с точностью до целых.

Оптические ***<u>базисные</u>***
шар-пилотные
измерения
скорости и направления ветра в свободной атмосфере

Главное отличие базисных от однопунктных наблюдений состоит в том, что при проведении базисных высоты подъем шар-пилота рассчитывается на основе теодолитных измерений, а не по вертикальной скорости его подъема.

Это достигается тригонометрическим расчетом высоты шар-пилота на основе проведения одновременных наблюдений с помощью двух оптических теодолитов, расположенных на известном расстоянии друг от друга.

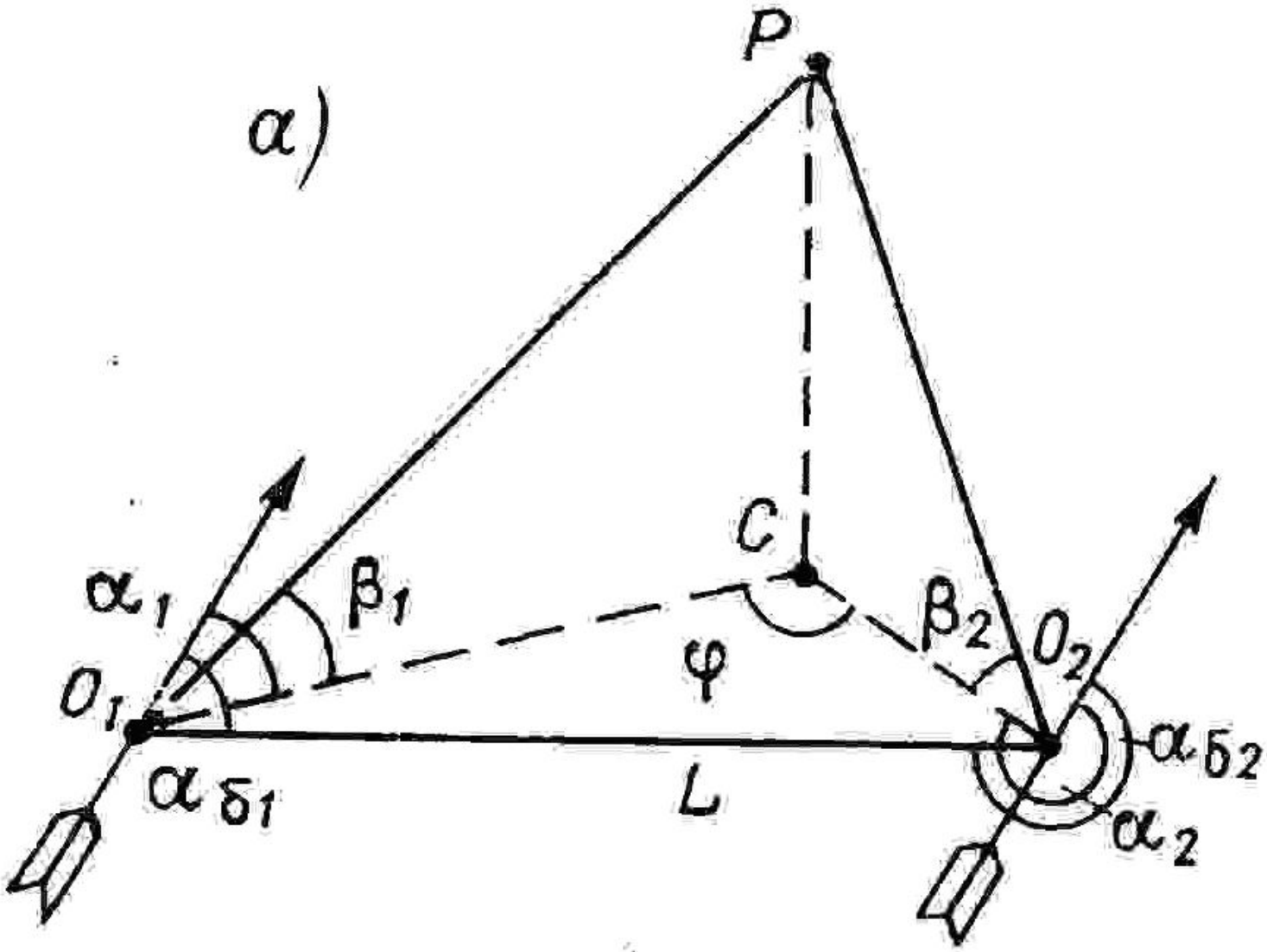


Схема двухпунктных (базисных) шаропилотных измерений при расположении теодолитов на одинаковой высоте

В данном методе расстояние между теодолитами (длина базы L) и углы ($\alpha_{Б1}$ и $\alpha_{Б2}$) для данной базы являются величинами постоянными и измеряются заранее.

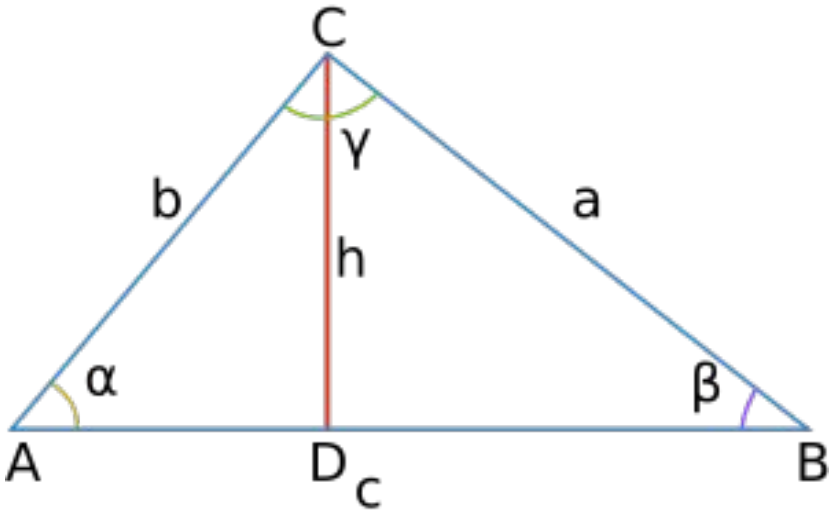
Для каждого момента времени t с помощью аэрологических теодолитов из точек O_1 и O_2 производится измерение вертикальных углов: β_1 и β_2, и горизонтальных углов: α_1 и α_2.

Наличие двух горизонтальных углов: α_1 и α_2, и углов $\alpha_{Б1}$ и $\alpha_{Б2}$ позволяет полностью решить треугольник O_1CO_2, так как известна одна из его сторон (сторона L) и все три угла:

$$\varphi_1 = \alpha_{\delta 1} \pm \alpha_1 \qquad \varphi_2 = \alpha_{\delta 2} \pm \alpha_2 \qquad \varphi = 180^0 - (\varphi_1 + \varphi_2)$$

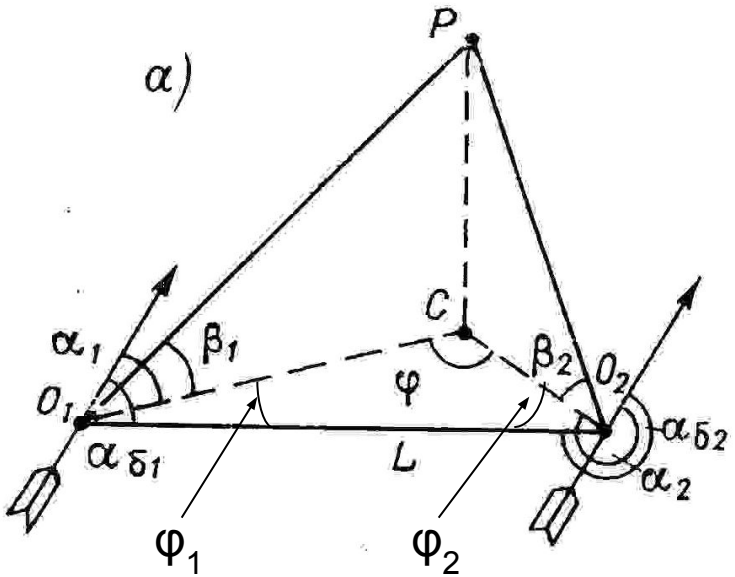
Если $\alpha_2 > \alpha_{Б2}$ и $\alpha_1 < \alpha_{Б1}$, то используется знак “плюс”; в остальных случаях - знак “минус”.

Теорема синусов:



$$\frac{a}{Sin\,\alpha} = \frac{b}{Sin\,\beta} = \frac{c}{Sin\,\gamma} = 2\,R$$

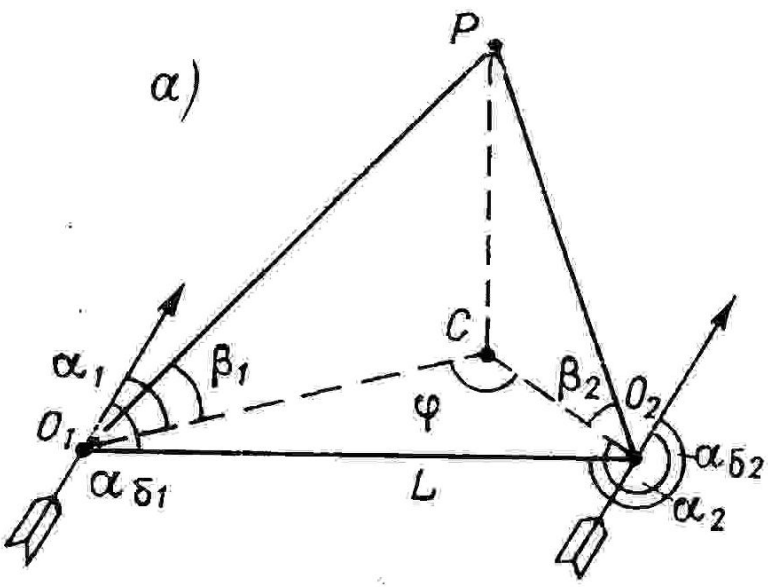
где *a, b, c* — стороны треугольника, *α, β, γ* — соответственно противолежащие им углы, а *R* — радиус описанной около треугольника окружности.



Для каждого момента времени t с помощью аэрологических теодолитов из точек O_1 и O_2 производится измерение горизонтальных углов α_1 и α_2. Таким образом, треугольник O_1CO_2 оказывается полностью заданным, так как известна одна из его сторон (сторона L) и все три угла.

Для треугольника O_1CO_2, используя теорему синусов, можно записать (см. рис.):

$$\frac{L}{Sin\varphi} = \frac{CO_2}{Sin\varphi_1} = \frac{CO_1}{Sin\varphi_2}$$



Откуда:

$$CO_2 = \frac{Sin\varphi_1}{Sin\varphi} L, \qquad CO_1 = \frac{Sin\varphi_2}{Sin\varphi} L.$$

$$CO_1 = L\frac{\sin(\alpha_2 - \alpha_{Б2})}{\sin\varphi}$$

Зная сторону CO_1 прямоугольного треугольника O_1CP можно определить высоту шар-пилота в разные моменты времени

$$H = CP = O_1C \ tg\beta_1$$

Таким образом, для определения высоты шар-пилота в различные моменты времени не требуется задания вертикальной скорости его подъема – высота рассчитывается по данным угловых измерений от двух теодолитов, расположенных на известном расстоянии друг от друга. Затем скорость и направление ветра определяется аналогично методу однопунктных наблюдений.

На практике для проведения базисных шар-пилотных наблюдений готовят две базы, расположенные приблизительно перпендикулярно друг другу.

Из этих двух баз для проведения конкретного наблюдения выбирают ту, которая расположена перпендикулярно предполагаемому движению шар-пилота.

Это связано с тем, что в случае перемещения проекций шар-пилота точно параллельно базе из тригонометрических расчетов нельзя будет определить высоты, на которых будет находиться шар-пилот.

Какие будут вопросы?

Поправки к высоте на кривизну Земли и рефракцию радиоволн

Дальность, м	Вертикальный угол δ, град														
	6	9	12	15	18	21	24	27	30	36	42	48	54	60	66
	(деления угломера)														
	1—00	1—30	2—00	2—30	3—00	3—50	4—00	4—50	5—00	6—00	7—00	8—00	9—00	10—00	11—00
20000	23	23	23	22	21	21	20	19	18	16	14	11	8	6	4
25000	36	36	36	35	33	32	31	30	28	25	22	17	13	9	6
30000	52	52	51	50	48	47	44	42	40	36	31	24	19	13	9
35000	71	71	69	68	65	63	60	57	54	48	42	32	25	18	12
40000	93	92	90	88	85	82	79	76	71	68	55	43	33	24	16
45000	118	117	114	111	108	103	97	94	89	80	70	54	41	30	20
50000	146	144	141	138	133	128	123	117	110	99	86	66	51	37	
55000	176	174	170	167	161	155	149	142	134	119	105	80	62	45	
60000	210	207	203	198	192	185	177	168	159	142	124	96	74	53	
65000	246	243	238	232	225	217	208	198	185	167	146	124			
70000	285	281	275	270	261	252	241	229	216	194	169	144			
75000	328	323	317	309	300	289	276	260	248	222	194				
80000	373	367	360	352	341	328	314	295	283						
85000	421	415	407	397	385	371	355	350	319						
90000	472	465	456	445	431	416	393	380							
95000	525	518	508	496	481	459	443	420							
100000	582	574	563	549	532	514	491								
105000	642	633	621	605	587	565									
110000	705	695	681	665	644	621									
115000	770	759	745	726	704	682									
120000	839	827	811	790	767	740									
125000	910	897	888	858	832	805									
130000	984	970	951	920	900										
135000	1061	1046	1026	1001											
140000	1141	1125	1103	1076											
145000	1224	1207	1184	1156											
150000	1310	1291	1267	1235											