

Центральная Аэрологическая Обсерватория
лаборатория новой техники

**ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ АП
«ЭОЛ»**

Азаров М.А.

Москва 2000.

Оглавление

Введение	2
1 Формат исходных данных зондирования	3
1.1 Структура INFO-файла	3
1.2 Структура TU-файла	4
1.3 Структура CRD-файла	5
2 Алгоритмы обработки координатной информации	6
2.1 Вычисление функции высоты подъёма радиозонда от времени $h(t)$	7
2.2 Вычисление функций горизонтальных координат зонда	7
2.3 Входной контроль достоверности координатных отсчётов	7
2.4 Вычисление распределения скорости и направления ветра по высотам	8
2.5 Определение параметров ветра на заданной высоте	10
2.6 Определение уровней максимальных ветров	10
2.7 Алгоритм выбора особых точек	11
3 Алгоритмы обработки метеоэлементов	12
3.1 Вычисление распределений метеоэлементов по высоте	12
3.2 Контроль достоверности значений температуры и относит. влажности	12
3.3 Рассчёт зависимости давления от высоты	13
3.4 Рассчёт метеоэлементов на заданной высоте	13
3.5 Рассчёт давления на заданной высоте	13
3.6 Рассчёт высоты по заданному давлению (изобары)	13
3.7 Определение уровня тропопаузы	14
3.8 Алгоритм выбора особых точек	14

Введение

В данном документе рассматриваются в общем виде алгоритмы работы программного обеспечения «аэрологический процессор "Эол"». В основном преследуется цель представления основных идей, заложенных в программное обеспечение, детали {} реализации здесь не приводятся чтобы не перегружать изложение.

Все приведённые здесь формулы и алгоритмы создавались в сотрудничестве с методистами Центральной Аэрологической Обсерватории.

1 Формат исходных данных зондирования

Формат исходных данных зондирования состоит из 3-х файлов, формируемых для каждого пуска аэрологического зонда:

- файл с информацией об условиях пуска и параметрах станции зондирования (INFO-файл);
- файл метеопараметров, измеренных зондом в полёте (TU-файл);
- файл сферических координат зонда, измеренных в полёте (CRD-файл).

Все файлы имеют одно и то же имя, различаются лишь расширением (.info, .tu, .crd). На основании информации, содержащейся в этих трёх файлах "Эол" строит все выходные телеграммы.

1.1 Структура INFO-файла

INFO-файл имеет расширение .info и содержит в себе набор из пар:

«имя параметра»:«значение»

Для обработки необходимыми являются следующие параметры:

- StationSynopticIndex — синоптический индекс станции
- StationLongitude — долгота места выпуска (град.)
- StationLatitude — широта места выпуска (град.)
- StationHeightAboveSeaLevel — высота места выпуска над уровнем моря (м.)
- OnGroundPressure — приземное давление в момент выпуска (мб.)
- OnGroundWindDirection — направление приземного ветра (град.)
- OnGroundWindVelocity — скорость приземного ветра (м/с)
- OnGroundHumidityError — разность между показаниями датчика влажности зонда и результатом наземных измерений (%).

- OnGroundTemperatureError — разность между показаниями датчика температуры зонда и результатом наземных измерений (°C).
- StartYear — год проведения выпуска
- StartMonth — месяц проведения выпуска
- StartDay — день проведения выпуска
- StartHour — час проведения выпуска
- StartMinute — минута проведения выпуска
- NebulosityCode — код состояния облачности в момент выпуска

Пример INFO-файла :

```
StationSynopticIndex : 24959
StationLongitude : 130
StationLatitude : 62
StationHeightAboveSeaLevel : 106
OnGroundPressure : 998.1
OnGroundWindDirection : 270
OnGroundWindVelocity : 1
OnGroundHumidityError : 18
OnGroundTemperatureError : 0
StartYear : 1998
StartMonth : 11
StartDay : 10
StartHour : 23
StartMinute : 31
NebulosityCode : 8077/
```

1.2 Структура TU-файла

TU-файл имеет расширение .tu и содержит в себе набор из отсчётов (троек значений) :

время полёта	температура	относит. влажность
(с)	(°C)	(%)

Каждый отсчёт начинается с новой строки, причём первым записывается отсчёт с временем полёта равным нулю и в нём в качестве температуры и влажности записываются соответствующие приземные значения, измеренные на земле штатными приборами станции. Далее отсчёты записываются в порядке увеличения значения времени полёта.

В случае отсутствия измерения по влажности или температуре вместо значения соответствующего параметра ставится значение -9999.

Пример TU-файла :

0	-21.9	77
6	-21.3609	82.1476
28	-20.9279	82.7449
49	-21.246	83.5929
70	-20.2988	83.7376
91	-19.739	82.3118
112	-20.1121	-9999 ¹
133	-18.6318	85.0415
154	-18.1042	87.0922
175	-18.1637	87.2376
197	-18.2492	87.6741
...
6082	-55.6016	23.7977
6104	-56.0624	22.3717
6125	-56.5288	22.1128
6146	-57.002	21.7248

1.3 Структура CRD-файла

CRD-файл имеет расширение .crd и содержит в себе набор из отсчётов (четвёрок значений):

время полёта (с)	наклонная дальность (м)	азимут (рад)	угол места (рад)
---------------------	----------------------------	-----------------	---------------------

Каждый отсчёт как и в TU-файле начинается с новой строки, причём первым записывается отсчёт с временем полёта равным нулю и в нём в качестве значений наклонной дальности, азимута и угла места записываются соответствующие приземные значения координат выпуска. Далее отсчёты записываются в порядке увеличения значения времени полёта.

¹здесь у нас нет информации по относит. влажности

Пример CRD-файла :

0	170	0.446093	-0.0680658
5	180.25	0.432742	-0.078674
15	170.25	0.500674	0.164532
25	192	0.762403	0.39863
36	237.5	1.03042	0.529263
46	309	1.27474	0.560746
57	409.25	1.45373	0.54905
67	507.25	1.64428	0.535341
77	613.75	1.80454	0.527384
88	720	1.92137	0.51889
98	819	1.98781	0.510204
...
5690	98577	1.81861	0.263069
5701	98884.2	1.81472	0.262302
5711	99201.2	1.813	0.260883
5722	99505.8	1.81022	0.261746
5732	99821.2	1.81227	0.261726

2 Алгоритмы обработки координатной информации

Введём обозначения для величин, входящих в отсчёты CRD-файла :

- $t_{crdi}, i \in \overline{1, n_{crd}}$ — значения времени в отсчётах в CRD-файле.
- $\alpha(t_{crdi})$ — сеточная функция зависимости азимута местоположения зонда от времени ;
- $\epsilon(t_{crdi})$ — сеточная функция зависимости угла места местоположения зонда от времени ;
- $d(t_{crdi})$ — сеточная функция зависимости наклонной дальности местоположения зонда от времени ;

2.1 Вычисление функции высоты подъёма радиозонда от времени $h(t)$

Функция зависимости высоты подъёма радиозонда от времени $h(t_{crdi})$ вычисляется по формуле :

$$h(t_{crdi}) = \sqrt{R_0^2 + d(t_{crdi})^2 - 2R_0d(t_{crdi}) \cos(\epsilon(t_{crdi}) + \pi/2)} - \sigma R_3, \quad \text{где } R_0 = h_0 + \sigma R_3. \quad (1)$$

В этой формуле принимается что Земля — шар радиуса σR_3 , где R_3 есть истинный радиус Земли, а σ есть коэффициент, вводимый для учёта рефракции электромагнитных волн луча радара в атмосфере и берётся равным примерно $7/8$.

2.2 Вычисление функций горизонтальных координат зонда

Горизонтальные координаты зонда вычисляются по обычным формулам для преобразования из сферических координат в прямоугольные. Здесь не учитывается сферичность земли и рефракция т.к. нас интересуют не абсолютные значения этих величин, а их производные, на которые поправки на сферичность и рефракцию влияют слабо . Таким образом имеем :

$$x(t_{crdi}) = d(t_{crdi}) \cos(\epsilon(t_{crdi})) \cos(\alpha(t_{crdi})), \quad (2)$$

$$y(t_{crdi}) = d(t_{crdi}) \cos(\epsilon(t_{crdi})) \sin(\alpha(t_{crdi})). \quad (3)$$

2.3 Входной контроль достоверности координатных отсчётов

Отсчёты проходят через входной контроль достоверности информации. Недостоверными считаются отсчёты, в которых скорость перемещения зонда по горизонтали v превышает 150 м/с, либо по скорости по вертикали v_h превышает 10 м/с. Скорости вычисляются по следующим формулам :

$$v = \frac{\sqrt{(x_{\text{тек}} - x_{\text{пред}})^2 + (y_{\text{тек}} - y_{\text{пред}})^2}}{t_{\text{тек}} - t_{\text{пред}}},$$

$$v_h = \frac{(h_{\text{тек}} - h_{\text{пред}})}{t_{\text{тек}} - t_{\text{пред}}}.$$

В этих формулах величины с индексом "тек" относятся к проверяемому на достоверность отсчёту, а с индексом "пред" — к последнему уже проверенному отсчёту. Наземный отсчёт ($t=0$) считаем априори достоверным.

Если текущий отсчёт признаётся недостоверным — он удаляется из дальнейших расчётов. Таким образом после отсеивания мы получим новые "прореженные" сеточные функции с прямоугольными координатами, с другими вообще говоря чем исходные t_{crdi} отсчётами времени, однако мы обозначим их так же и далее будем под t_{crdi} понимать уже эти прошедшие проверку на достоверность отсчёты.

2.4 Вычисление распределения скорости и направления ветра по высотам

Так как точность измерения угловых координат зонда станцией зондирования величина постоянная и не зависит от наклонной дальности, то мы получаем ситуацию когда точность локализации зонда в пространстве падает по мере увеличения расстояния до зонда. Это сказывается на точности измеряемых значений скорости и направления ветра. С целью уменьшения влияния этих эффектов необходимо иметь возможность контролировать ошибки измерения параметров ветра за счёт регулирования толщины слоя, в котором измеряется ветер.

Пусть мы измеряем скорость и направление ветра в некотором слое по высоте по формулам:

$$V = \Delta / \Delta t, D = \arctan(\Delta x / \Delta y),$$

где Δx и Δy — смещения зонда по горизонтали по координатам x и y соответственно на нижней и верхней границе слоя, а $\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$. Параметр Δt есть время за которое зонд пролетел слой.

Для оценки ошибки измерения скорости и направления ветра «Эол» использует формулы:

$$\delta_V = d * \sigma / \Delta t — \text{ошибка в скорости ветра,} \quad (4)$$

$$\delta_D = d * \sigma / \Delta — \text{ошибка в направлении ветра.} \quad (5)$$

Здесь d — средняя наклонная дальность в слое, σ — ошибка измерения угловых координат.

Имея в распоряжении формулы (4) и (5) «Эол» из набора координатных отсчётов создаёт новый набор, в который включаются только отсчёты, образующие слои, в которых параметры ветра меряются на хуже чем нам это необходимо. Обозначим эти отсчёты индексом «ветр»:

$$h(t_{\text{ветр}_i}), x(t_{\text{ветр}_i}), y(t_{\text{ветр}_i}).$$

Далее отсчёты $x(t_{\text{ветр}_i}), y(t_{\text{ветр}_i})$ дифференцируются по времени и получаем отсчёты производных $dx(t_{\text{ветр}_i}), dy(t_{\text{ветр}_i})$. Для дифференцирования используется второе приближение полиномиальной интерполяции:

$$\begin{aligned} dx(t_{\text{ветр}_i}) = & x(t_{\text{ветр}_{i+1}}) \frac{t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i-1}}}{(t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i+1}})(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_{i+1}})} + \\ & + x(t_{\text{ветр}_i}) \frac{t_{\text{ветр}_{i+1}} - 2t_{\text{ветр}_i} + t_{\text{ветр}_{i-1}}}{(t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i+1}})(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_i})} + \\ & + x(t_{\text{ветр}_{i-1}}) \frac{t_{\text{ветр}_{i+1}} - t_{\text{ветр}_i}}{(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_i})(t_{\text{ветр}_{i+1}} - t_{\text{ветр}_{i-1}})}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dy(t_{\text{ветр}_i}) = & y(t_{\text{ветр}_{i+1}}) \frac{t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i-1}}}{(t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i+1}})(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_{i+1}})} + \\ & + y(t_{\text{ветр}_i}) \frac{t_{\text{ветр}_{i+1}} - 2t_{\text{ветр}_i} + t_{\text{ветр}_{i-1}}}{(t_{\text{ветр}_i} - t_{\text{ветр}_{i+1}})(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_i})} + \\ & + y(t_{\text{ветр}_{i-1}}) \frac{t_{\text{ветр}_{i+1}} - t_{\text{ветр}_i}}{(t_{\text{ветр}_{i-1}} - t_{\text{ветр}_i})(t_{\text{ветр}_{i+1}} - t_{\text{ветр}_{i-1}})}. \quad (7) \end{aligned}$$

После дифференцирования направление ветра вычисляется как :

$$D(t_{\text{ветр}_i}) = \arctan(dy(t_{\text{ветр}_i})/dx(t_{\text{ветр}_i})), \quad (8)$$

скорость ветра как :

$$V(t_{\text{ветр}_i}) = \sqrt{dx(t_{\text{ветр}_i})^2 + dy(t_{\text{ветр}_i})^2}. \quad (9)$$

Полученный профиль направление и скорости ветра проходит проверку на достоверность. Отбрасываются те отсчёты в профиле, в которых градиент скорости ветра превышает по абсолютной величине $30 \frac{\text{м}}{\text{с}\cdot\text{км}}$.

Таким образом на выходе получаем профиль ветра, состоящий из отсчётов :

$$h(t_{\text{ветр}_i}), D(t_{\text{ветр}_i}), V(t_{\text{ветр}_i}). \quad (10)$$

2.5 Определение параметров ветра на заданной высоте

Для определения скорости и направления ветра на заданной высоте из рассчитанного профиля ветра (10) восстанавливаются при помощи линейной интерполяции непрерывные функции $V(h), D(h)$ — зависимости скорости и направления ветра от высоты подъёма. Если расстояние между узлами интерполяции более 1000 м — интерполяция не производится. Наконец берутся значения $V(h)$ и $D(h)$ на нужной высоте.

2.6 Определение уровней максимальных ветров

По определению принимается максимумом уровень выше 500 мб такой что на нём скорость ветра больше 30 м/с, на 2 км выше и ниже его есть уровни с скоростью ветра меньшей более чем на 10 м/с и нет уровней с большей скоростью.

Дополнительно определяем уровень наибольшего ветра как уровень выше 500 мб такой что на нём скорость ветра больше 30 м/с и больше скорости на всех остальных уровнях.

Для уровней ниже 100 мб и выше 100 мб уровни максимальных ветров определяются отдельно.

И ниже 100 мб и выше 100 мб берутся 3 наибольших по значению скорости ветра максимума, обязательно включая уровень наибольшего

ветра. Если имеется более одного максимума с одной скоростью, то приоритет отдаётся тому что расположен ниже.

Дополнительно для 2-х наибольших по величине скорости максимумов рассчитываются вертикальные сдвиги. Если уровень с наибольшим ветром является наивысшей точкой зондирования, то для него сдвиги не рассчитываются. Рассчитываются сдвиги по формулам:

$$\Delta_{\text{нижн}} = \sqrt{V(H)^2 + V(H_-)^2 - 2V(H)V(H_-)\cos(D(H_-) - D(H))},$$

для нижнего сдвига и

$$\Delta_{\text{верхн}} = \sqrt{V(H)^2 + V(H_+)^2 - 2V(H)V(H_+)\cos(D(H_+) - D(H))},$$

для верхнего, причём

- $V(H), V(H_-), V(H_+)$ — скорости ветра на уровне максимума, на уровне 1000 м выше и на 1000 м ниже;
- $D(H), D(H_-), D(H_+)$ — направления ветра на уровне максимума, на 1000 м выше и на 1000 м ниже.

2.7 Алгоритм выбора особых точек

Особые точки по направлению и скорости ветра выбираются алгоритмом, максимально приближающим процесс работы аэролога-человека.

Алгоритм можно разделить на шаги:

- Первым шагом на профиле выбираются точки изменения знака градиента профиля направления (скорости) ветра.
- Далее производится критический просмотр выбранных точек на предмет возможности их удаления. То есть решается будет ли локально (в пределах интересующей нас точки и двух соседних) выполняться критерий выбора особых точек если рассматриваемую точку удалить? Если да — точка удаляется из списка особых.
- На последнем шаге производится анализ на предмет выполнения глобального (по всему профилю сразу) критерия выбора особых точек. Если есть особые точки, между которыми критерий не выполняется — добавляется нужное количество особых точек до выполнения критерия, причём ставятся особые точки в место наибольшего расхождения с линейно-интерполированным значением.

Критерий выбора особых точек — восстановление профиля в заданной точностью (5 м/с для скорости ветра и 10° для направления).

Обязательно считаются особыми точки: земля, 100 мб, первая точка профиля после 100 мб и точка окончания зондирования.

3 Алгоритмы обработки метеоэлементов

Как и в главе 2 введём обозначения для величин, входящих в TU-файл:

- $t_{tui}, i \in \overline{1, n_{tu}}$ — значения времени в отсчётах TU-файла,
- $T(t_{tui})$ — значения температуры,
- $U(t_{tui})$ — значения относительной влажности.

3.1 Вычисление распределений метеоэлементов по высоте

Для того чтобы получить распределение метеоэлементов по высоте для каждого TU-отсчёта с временем t_{tui} «Эол» находит значение высоты подъёма $h(t_{tui})$, на которой зонд был в это время. Для этого используется профиль высоты подъёма, получаемый в ходе обработки координатной информации (см. главу 2.1). Значения $h(t_{tui})$ находятся путём восстановления сеточной функции зависимости высоты подъёма от времени $h(t_{crdi})$ в непрерывную функцию $h(t)$ с использованием линейной интерполяции. Далее производится выборка значений $h(t)$ в узлах t_{tui} .

Таким теперь образом имеем отсчёты:

$$h(t_{tui}), T(t_{tui}), U(t_{tui}). \quad (11)$$

3.2 Контроль достоверности значений температуры и относит. влажности

Контроль достоверности производится путём проверки на вход в допуски самих величин а для температуры дополнительно её градиента. Допустимыми значениями влажности считаются значения от 0% до 100%, а температуры от -90°C до 90°C . Допустимыми значениями градиента температуры считаются значения от $-15^\circ\text{C}/\text{км}$ до $30^\circ\text{C}/\text{км}$. Отсчёты, не проходящие проверку удаляются из дальнейших расчётов.

3.3 Расчёт зависимости давления от высоты

Зависимость давления от высоты вычисляется по бараметрической формуле с использованием профиля значений температуры:

$$P(t_{tu_i}) = \sum_{k=1}^i P_0 e^{\gamma \frac{1}{2} (h(t_{tu_k}) - h(t_{tu_{k-1}})) \left(\frac{1}{273.15 + T(t_{tu_{k-1}})} + \frac{1}{273.15 + T(t_{tu_k})} \right)}, \quad (12)$$

где $\gamma \simeq -0.034$.

3.4 Расчёт метеоэлементов на заданной высоте

Для температуры и относительной влажности расчёт происходит по той же схеме как и в главе 2.5. Сначала восстанавливаем из профиля метеоэлементов линейной интерполяцией (11) непрерывные функции $T(h)$ и $U(h)$ — зависимости температуры и относительной влажности от высоты, затем берутся их значения на нужной высоте.

3.5 Расчёт давления на заданной высоте

Для расчёта давления используется более сложная процедура чем для метеоэлементов, т.к. использовать линейную интерполяцию в этом случае нельзя. Для восстановления непрерывной функции давления $P(h)$ используется всё та же бараметрическая формула (12). В формуле в качестве i берётся номер отсчёта, который по высоте расположен ближе всего снизу значения аргумента функции $P(h)$. Вместо $h(t_{tu_i})$ в формулу подставляется h , а вместо $T(t_{tu_i})$ подставляется $T(h)$ — значение температуры на высоте h .

3.6 Расчёт высоты по заданному давлению (изобары)

Высота по заданному давлению рассчитывается при помощи метода последовательных приближений. Первоначально находятся отсчёты профиля давления $P(t_{tu_i})$ между значениями которых находится данное давление P . Далее, используя интерполяцию (см. главу 3.5), последовательным делением пополам отрезков, содержащих в себе искомую высоту находим её с необходимой точностью.

3.7 Определение уровня тропопаузы

Уровнем тропопаузы считается уровень выше 500 мб, являющийся нижней границей слоя с градиентом температуры меньшим или равным величине порога $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Если выше найденного уровня тропопаузы найдётся слой толщиной 1 км с градиентом большим $3^{\circ}\text{C}/\text{км}$ - ищем вторую и все последующие тропопаузы.

3.8 Алгоритм выбора особых точек

Общий алгоритм выбора особых точек идентичен выбору особых точек по ветру, описанному в главе 2.7. Единственное различие состоит в том что критерий для температуры — восстановление профиля по особым точкам с точностью 1°C ниже тропопаузы и 2°C выше. Для относительной влажности необходимая точность составляет 15%.