

В.С. Комаров, А.В. Креминский

К ПРОБЛЕМЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ МЕЗОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Обсуждается один из возможных алгоритмов для решения задачи рационального размещения аэрологических станций в свете требований объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей. Анализ численных результатов показал, что максимально допустимые расстояния l_m для типичного мезометеорологического полигона составляют для температуры – 120 км, а для составляющих вектора ветра около 60 км.

Проблема объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей (т. е. полей с горизонтальным масштабом порядка десятков и сотен километров [1]) стала наиболее актуальной в самые последние годы, когда в практике метеорологических исследований стали использоваться новейшие системы дистанционного лидарного зондирования, которые в отличие от радиозондовых систем позволяют оценивать структуру и состав атмосферы (особенно в пограничном слое) с достаточно высоким временным и пространственным разрешением. А это очень важно для решения проблемы объективного анализа мезометеорологических полей, используемого при численной оценке эволюции мезометеорологических процессов и локальном прогнозе погоды (на основе уравнений мезометеорологии), а также при решении задач локального диагноза и прогноза распространения загрязняющих веществ на ограниченных территориях.

Успешность объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей зависит в значительной степени от рационального размещения сети аэрологических (и в первую очередь, лидарных) станций. При этом к такому размещению станций предъявляются два важных требования:

во-первых, аэрологические (в том числе лидарные) станции должны располагаться таким образом, чтобы ошибки восстановления вертикальных профилей метеорологических величин (например, геопотенциала, температуры, ветра) в каждом узле некоторой сетки, осуществляемого по данным имеющихся станций, были меньше, чем заданная погрешность (она определяется требованиями решаемой задачи);

во-вторых, число используемых для объективного анализа станций должно быть минимальным, а сами станции должны располагаться, по возможности, в узлах применяемой регулярной сетки.

Исходя из указанных требований, задача рационального размещения аэрологических станций сводится к определению максимально допустимого расстояния между отдельными станциями, расположенными на рассматриваемом мезометеорологическом полигоне, которое позволяло бы осуществить оценку (причем с нужной точностью) искомым значений метеорологических величин во всех узлах взятой регулярной сетки, привязанной к этому полигону.

Здесь следует обратить внимание на одно важное обстоятельство. Если проблема рационального размещения сети метеорологических и аэрологических станций, решаемая в интересах объективного анализа макромасштабных полей метеорологических величин, исследована к настоящему времени достаточно полно (см., например, обзор [2]), то эта же проблема, реализуемая применительно к объективному анализу мезометеорологических полей, еще до сих пор не решена.

Учитывая все вышесказанное, авторами сделана попытка построения специализированного алгоритма для решения задачи о рациональном размещении аэрологических станций в свете требований объективного анализа мезометеорологических полей.

В настоящей статье и рассматривается этот алгоритм, а также оцениваются результаты его апробации на примере данных температуры и ветра. Основным исходным материалом для этого послужили данные экспериментальных наблюдений 6 аэрологических станций, пред-

ставляющих типичный мезометеорологический полигон (его план показан на рис. 1), который расположен на территории западных областей Украины и Белоруссии. Используемые аэрологические наблюдения охватывают период с 24 ноября до 7 декабря 1991 г. и приведены к некоторой системе геометрических высот (0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 и 8,0 км), позволяющих детально описать вертикальную структуру полей температуры и ветра почти во всем слое тропосферы.

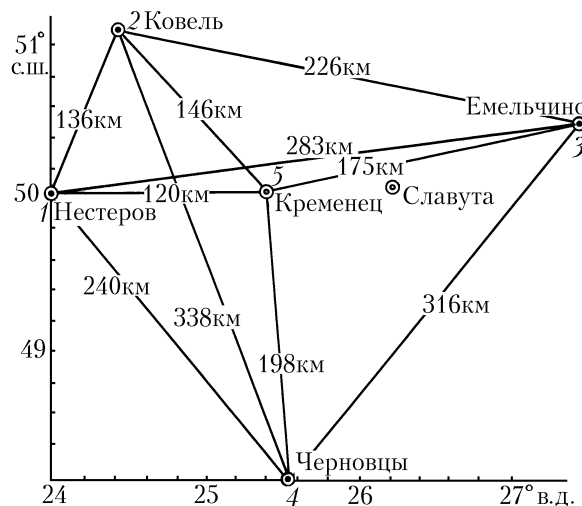


Рис. 1. Схема типичного мезометеорологического полигона

Здесь сразу следует сказать, что все тропосферные уровни были использованы нами лишь на предварительном этапе, когда осуществлялась оценка пространственной изменчивости температуры и составляющих скорости ветра в приземном и пограничном слоях, а также в свободной атмосфере. Анализ пространственной изменчивости средних значений взятых метеорологических величин показал, что наибольшие их пространственные вариации отмечаются в приземном слое. Учитывая это, а также аналогичные результаты, полученные ранее для пространственных корреляционных функций температуры и ветра (см., например, [2]), для решения задачи по выбору максимально допустимых расстояний между станциями были использованы лишь данные приземного слоя.

Остановимся теперь коротко на рассмотрении алгоритма, использованного нами для решения задачи о рациональном размещении станций зондирования, требуемых для объективного анализа мезометеорологических полей. В основу этого алгоритма положен наиболее простой количественный подход к задаче рационального расположения станций, который был выдвинут впервые в работе О.А. Дроздова и А.А. Шепелевского [3] и О.А. Дроздова [4] и базируется на оценке средней квадратической ошибки линейной интерполяции метеорологической величины в точке отрезка, соединяющего две соседние станции. Поскольку можно предположить, что средняя квадратическая ошибка $E_{2л}$ линейной интерполяции на середину отрезка, соединяющего две станции, является наибольшей, то авторы [3, 4] предложили при решении задачи рационального размещения станций исходить из оценки этой ошибки. В таком случае процедура интерполяции сводится к простому определению среднего арифметического из значений на станциях.

При условиях, что поле рассматриваемой метеорологической величины является однородным и изотропным по отношению к пространственной корреляционной функции $\mu(l)$, что вполне допустимо для территории мезометеорологического полигона, а ошибки его измерения – случайными, для оценки меры ошибки интерполяции $\varepsilon_{2л}^2$ (здесь $\varepsilon^2 = E^2/\sigma^2$, где σ^2 – дисперсия метеорологической величины) можно получить достаточно простую формулу [4]

$$\varepsilon_{2л}^2(l) = \frac{3}{2} - 2\mu(l/2) + \frac{1}{2}\mu(l) + \frac{1}{2}\eta^2, \quad (1)$$

где l – расстояние между станциями; $\mu(l)$ – пространственная корреляционная функция метеорологической величины; $\eta^2 = \Delta^2/\sigma^2$ – так называемая мера ошибок измерения (здесь Δ^2 – дисперсия ошибок наблюдения, а σ^2 – дисперсия метеорологической величины).

Рассчитав корреляционную функцию рассматриваемой метеорологической величины, например с помощью некоторого аналитического выражения, имеющего вид:

для температуры [7]

$$\mu_T(l) = \exp(-0,825l^{0,92}), \quad (2)$$

а для составляющих вектора ветра [8]

$$\mu_V(l) = \mu_r(l) = (1 - 0,98l)\exp(-0,98l), \quad (3)$$

и зная величину дисперсии ошибок измерения, можно легко найти с помощью формулы (1) максимально допустимое расстояние между станциями l , равное расстоянию, при котором мера ошибки интерполяции на середину отрезка между станциями равнялось бы некоторой заданной величине. В качестве такой величины в [3, 4] предлагается, в частности, использовать

$$\varepsilon = \eta, \quad (4)$$

т.е. требовать, чтобы точность интерполяции совпадала с точностью измерения метеорологической величины.

В заключение следует подчеркнуть, что выбор максимально допустимых расстояний между отдельными станциями проводился нами несколько иначе, чем в [3, 4]. В частности, в формуле (1) используется не мера ошибок измерения η^2 , а мера допускаемых ошибок η_d^2 , определяемая из выражения

$$\eta_d^2 = \delta^2/\sigma^2, \quad (5)$$

где δ^2 – дисперсия допускаемой погрешности оценки метеорологической величины; σ^2 – дисперсия этой величины, поскольку величины δ^2 , как правило, больше Δ^2 (например, точность измерения температуры, выражаемая стандартной ошибкой Δ_T , составляет в нижней части тропосферы около 0,7 [5], а соответствующая погрешность δ_T , допускаемая Всемирной метеорологической организацией, равна 1 [6]).

Кроме того, в формуле (2) вместо величины η берется ее минимальное значение η_{\min} , определяемое по всем значениям величины η , которые были рассчитаны для каждой из 6 станций мезометеорологического полигона с учетом стандартной погрешности измерений метеорологической величины Δ .

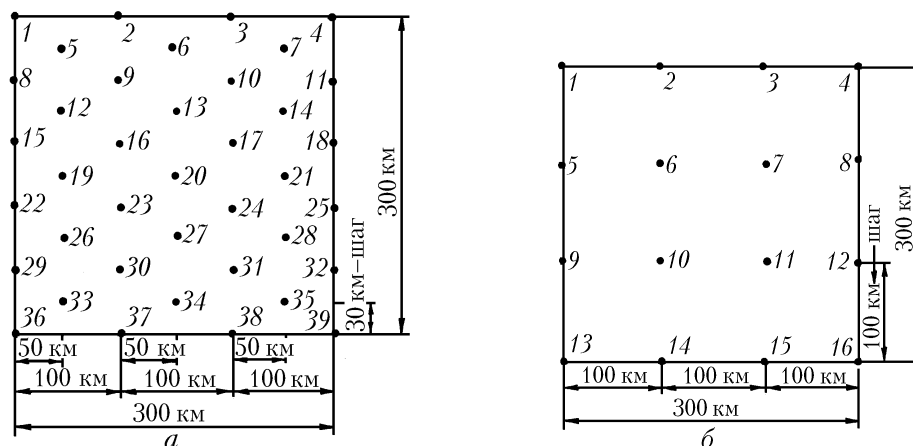


Рис. 2. Схема размещения станций на мезометеорологическом полигоне: $l_m = 60$ км (а) и 100 км (б)

Рассмотрим теперь результаты численного оценивания максимально допустимых расстояний между станциями (рис. 2), расположенными на территории взятого мезометеорологи-

ческого полигона. В табл. 1 приведены для всех станций этого полигона значения стандартных (средних квадратических) отклонений σ и допускаемых η_d ошибок, рассчитанных по данным наземных измерений температуры (T , °C), зональной (U , м/с) и меридиональной (V , м/с) составляющих вектора ветра, причем величины η_d оценены с помощью формулы (3).

Из табл. 1 хорошо видно, что на территории исследуемого мезометеорологического полигона, несмотря на его небольшие размеры (о чем можно судить из рис. 1), отмечаются заметные изменения величин σ и η_d по пространству, особенно для полей температуры и зонального ветра. Поэтому особенности пространственных вариаций этих величин учитывались нами при определении значений меры ошибки интерполяции $\varepsilon_{2,1}^2$ и расстояний между станциями l_m , которые рассчитывались по формуле (1) для всех возможных расстояний между станциями и приведены в табл. 2. Здесь следует отметить, что в табл. 2 вместо $\varepsilon_{2,1}^2$ даются стандартные ошибки интерполяции $\varepsilon_{2,1}$, а первая строка той же таблицы содержит значения этой ошибки, рассчитанные по формуле (1) при заданном значении расстояния между станциями l_m , равном 30 км.

Таблица 1

Среднеквадратические отклонения (σ) и мера ошибки измерения (η) температуры (T), зональной (U) и меридиональной (V) составляющих скорости ветра для типичных станций мезометеорологического полигона

| Станция | T | | U | | V | |
|-----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | σ | η | σ | η | σ | η |
| Нестеров | 4,0 | 0,090 | 2,3 | 0,272 | 1,4 | 0,735 |
| Ковель | 4,3 | 0,078 | 1,7 | 0,498 | 1,4 | 0,735 |
| Кременец | 4,4 | 0,075 | 2,3 | 0,272 | 1,4 | 0,735 |
| Емельчино | 3,9 | 0,095 | 2,3 | 0,272 | 1,5 | 0,64 |
| Черновцы | 3,7 | 0,105 | 2,2 | 0,298 | 1,6 | 0,563 |
| Славута | 4,2 | 0,085 | 2,3 | 0,280 | 1,4 | 0,695 |

Таблица 2

Значения меры ошибок интерполяции (ε) в зависимости от расстояния между станциями (l_m)

| T | | U | | V | |
|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| ε | l_m | ε | l_m | ε | l_m |
| 0,0744 | 60 | 0,2706 | 60 | 0,5735 | 60 |
| 0,0751 | 120 | 0,3630 | 120 | 0,6225 | 120 |
| 0,0755 | 136 | 0,3839 | 136 | 0,6348 | 136 |
| 0,0757 | 146 | 0,3963 | 146 | 0,6424 | 146 |
| 0,0768 | 175 | 0,4303 | 175 | 0,6640 | 175 |
| 0,0778 | 198 | 0,4554 | 198 | 0,6805 | 198 |
| 0,0795 | 226 | 0,4840 | 226 | 0,7000 | 226 |
| 0,0804 | 240 | 0,4977 | 240 | 0,7095 | 240 |
| 0,0839 | 283 | 0,5373 | 283 | 0,7378 | 283 |
| 0,0871 | 316 | 0,5655 | 316 | 0,7586 | 316 |

Анализ табл. 2 показывает, что максимально допустимые расстояния l_m для станций этого мезометеорологического полигона (при условии, что ε равно η_{\min} , приведенному в табл. 1) составляют для температуры 120 км, а для составляющих вектора ветра около 60 км. Из этого следует, что для рационального размещения сети аэрологических станций (включая лидарные станции) на мезометеорологических полигонах необходимо, чтобы наибольшие расстояния l_m между соседними станциями этого полигона не превышали 60 км. В этом случае будут соблюдены основные требования объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей (особенно по отношению к минимуму ошибок интерполяции), проводимого для комплекса «температура – ветер».

В заключение остановимся на рассмотрении типичной схемы рационального размещения радиометеорологических (или лидарных) станций на территории типичного мезометеорологического полигона, имеющего горизонтальные размеры порядка 300 км и площадь около 300×300 км, что соответствует площади элементарной ячейки сетки точек крупномасштабной глобальной модели (1), используемой для численного прогноза погоды. Указанная схема представлена на рис. 2, а. Из нее следует, что наилучшие результаты объективного анализа

трехмерной структуры полей температуры и ветра, осуществляемого на типичном мезометеорологическом полигоне, могут быть получены при наличии на территории этого полигона около 39 станций высотного зондирования. Подобное число станций позволяет провести пространственную интерполяцию (экстраполяцию) вертикальной структуры полей температуры и ветра с минимальной ошибкой, причем на всех взятых уровнях тропосферы, включая уровень подстилающей поверхности.

Несколько иная схема размещения аэрологических станций может быть принята (см. рис. 2, б), если мы будем использовать при оценке максимально допустимого расстояния l_m не значение η_{\min} , а среднее из всех величин η , приведенных в табл. 1. В этом случае максимально допустимое расстояние l_m для комплекса «температура – ветер» составляет уже около 100 км, а число требуемых станций при этом снижается до 16.

Все перечисленные выше выводы, естественно, требуют своего подтверждения и по данным других полигонов, а также на основе более полного статистического материала.

1. Белов П. Н., Борисенков Е. П., Панин Б. Д. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 376 с.
2. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 359 с.
3. Дроздов О. А., Шепелевский А. А. // Труды НИУ ГУГМС. 1946. Сер. 16. Вып. 13. С. 5–115.
4. Дроздов О. А. // Труды ГГО. 1961. Вып. 123. С. 33–46.
5. Решетов В. Д. // Труды ЦАО. 1978. Вып. 133. С. 55–64.
6. Технический регламент. Т. 1. (Общая часть). Изд. 2-е. ВМО. N 49. Од. 2. Женева, 1959. Дополнение N 2. Женева, 1963.
7. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и их применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 319 с.
8. Либерман Ю. М. // Труды III Всесоюзного симпозиума по применению статистических методов в метеорологии. М.: Гидрометеоздат, 1978. С. 162–165.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
27 ноября 1995 г.

V. S. Komarov, A. V. Kreminskii. To the Problem of the Best Siting of Aerological Stations for Objective Analysis of Three-dimensional Structure of Mesometeorological Fields.

A possible algorithm for solution of the problem of aerological stations judicious siting fitting the requirements of objective analysis of mesometeorological fields three-dimensional structure is discussed in the paper. The analysis of numerical simulation results has shown the maximum admissible distances l_m for typical mesometeorological proving ground to be 120 km for temperature and about 60 km for wind vector components.