

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

ТРУДЫ

ВЫПУСК 280

МЕТОДИКА  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ  
НАБЛЮДЕНИЙ

Под редакцией  
канд. физ.-мат. наук  
Д. П. БЕСПАЛОВА

БИБЛИОТЕКА  
Ленинградского  
Гидрометеорологического  
Института



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ  
ЛЕНИНГРАД • 1972

Освещаются вопросы усовершенствования методики метеорологических и теплобалансовых наблюдений; методы поверки метеорологических приборов, обработки и обобщения результатов наблюдений. Основная часть работ относится к методике автоматизированной обработки и обобщению метеорологических данных с применением ЭВМ и методов поверки автоматических станций и устройств.

Предназначены для специалистов метеорологов и климатологов, работающих в научно-исследовательских институтах гидрометслужбы и на сети гидрометстанций, а также для научных сотрудников и инженеров смежных специальностей.

2-9-7

81-71

Труды ГГО, вып. 280

## МЕТОДИКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Редактор *Л. В. Царькова*

Техн. редактор *М. С. Костакова*

Корректоры: *П. В. Стебливец, Л. И. Хромова*

---

Сдано в набор 2/IX 1971 г. Подписано к печати 20/I 1972 г. М-08028. Бумага 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
тип. № 1. Печ. л. 13,5. Уч.-изд. л. 14,42. Тираж 900 экз. Индекс МЛ-80. Заказ № 531.  
Цена 1 руб. 01 коп. Гидрометеиздат. Ленинград, В-53, 2-я линия, д. 23.

---

Ленинградская типография № 8 Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Ленинград. Прачечный пер., д. 6

## ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ВЫБОРЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДИСКРЕТНЫХ ОТСЧЕТОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Принятая методика метеорологических измерений, как и техническая реализация метеорологических приборов, в значительной мере ориентируется на участие в процессе измерения наблюдателя. Копирование этой методики для автоматических измерений, обладающих рядом особенностей, а также существенно большими возможностями (с точки зрения объема получаемой при измерениях и обрабатываемой информации, быстродействия, гибкости и т. д.), представляется нецелесообразным. Здесь возможны более эффективные решения и требуется их методическая и техническая проработка.

Широкий круг методов автоматических измерений сводится к нахождению различных характеристик метеорологических элементов (в том числе выдаваемых как результаты одиночного наблюдения) по ряду отсчетов одного или нескольких (однотипных или разных) приборов. Таким путем может быть обеспечена большая репрезентативность измерений за счет временного или пространственного осреднения, уменьшены случайные погрешности, скорректирована динамическая погрешность датчиков, исключены ложные отсчеты и т. д. Существенный интерес представляет, например, автоматическая коррекция систематической погрешности измерительной системы по результатам измерений эталонов (выступающих как самостоятельные датчики) или нахождение экстремальных и средних значений метеорологического элемента не с помощью специальных датчиков, а путем соответствующей обработки последовательных измерений текущего значения элемента. Использование подобных методов в ряде случаев позволяет исключить или существенно упростить автономные датчики и повысить точность и репрезентативность измерений.

Методические вопросы, возникающие при автоматизации метеорологических наблюдений, непосредственно связаны с вопросами технической реализации автоматических измерительных устройств, т. е. с выбором характеристик датчиков, вторичных преобразователей, измерительного устройства и устройства первичной обработки.

Вместе с тем указанные вопросы представляют и значительно более широкий интерес. Измерение метеорологических процессов и полей, как правило, связано с их дискретизацией (во времени

и в пространстве), в результате которой непрерывный процесс представляется при помощи некоторого набора его отсчетов. При этом возникает тождественная поставленной выше задача определения характеристик процесса (для отдельных представляющих интерес точек поля и моментов времени или для текущего аргумента, т. е. процесса в целом) по результатам наблюдений в отдельных точках пространства и в отдельные моменты времени (задачи объективного анализа метеорологических полей и др.). Поэтому рассматриваемые методические вопросы, касающиеся приборов, совпадают с общими вопросами методики метеорологических наблюдений (об оптимальном осреднении процесса, репрезентативности точечных наблюдений и т. п.). Подробнее последний вопрос обсуждается ниже.

При всем разнообразии задачи, связанные с дискретизацией метеорологического процесса (по времени или по пространству) и нахождением искомых характеристик процесса по дискретным отсчетам, требуют решения однотипных методических вопросов, таких, как выбор оптимального осреднения по времени и пространству при получении отсчета (в частности, динамических характеристик приборов), частоты измерений (густоты сети), числа и расположения обрабатываемых измерений, способа обработки, необходимой точности измерений и т. д.

Дискретизация процесса сопровождается потерей информации, поскольку реальные метеорологические процессы не удовлетворяют теореме В. А. Котельникова; эта потеря в общем случае тем больше, чем меньше частота дискретизации.

В большинстве работ, посвященных различным задачам нахождения характеристик процесса по его отсчетам (задачи интерполяции, приближенного интегрирования и т. д.), в качестве отсчетов принимаются мгновенные значения процесса либо суммы этих значений и погрешностей измерений. Как правило, это делать нецелесообразно. В общем случае для задач, характеризующихся дискретизацией процесса и обработкой дискретных отсчетов, в качестве отсчетов (относимых к определенным пространственным и временным координатам) следует брать не значения измеряемой величины для этих координат, а некоторые значения, представляющие собой результат определенного преобразования (осреднения) процесса во времени и пространстве. Соответствующее линейное преобразование может быть представлено в виде

$$z(u_i, v_i, l_i, t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int x(u_i - u, v_i - v, l_i - l, t_i - t) h_i(u, v, l, t) du dv dl dt, \quad (1)$$

где  $z(u_i, v_i, l_i, t_i)$  — отсчет, относимый к координатам  $u_i, v_i, l_i$  и моменту времени  $t_i$ ,  $x(u, v, l, t)$  — изучаемый метеорологический элемент,  $h_i(u, v, l, t)$  — весовая функция, характеризующая влияние значений процесса  $x$  на данный отсчет.

Устройство, осуществляющее осреднение процесса (во времени и в пространстве) при получении отсчета, в дальнейшем будем называть входным фильтром, а определение характеристик метеорологических процессов по ряду отсчетов безынерционного и осредняющего прибора — соответственно использованием дискретного и аналого-дискретного фильтров. Как следует из (1), первые фильтры являются частным случаем вторых, при котором весовые функции  $h_i$  — дельта-функции.

Осреднение при получении отсчета, осуществляемое входным фильтром, понимается в том смысле, что результат измерения определяется не мгновенным значением процесса в точке отсчета (значением  $x(t_i)$  на рис. 1 а), а в общем случае всеми значениями

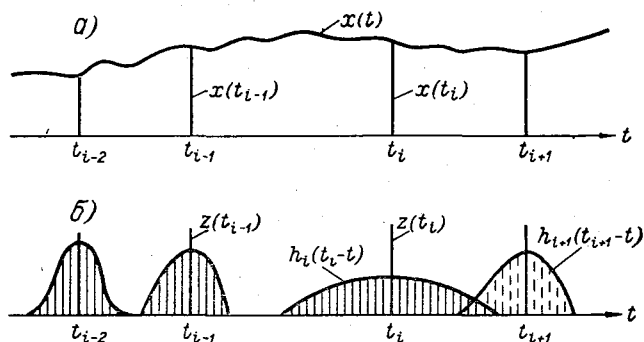


Рис. 1.

процесса в некоторой временной и пространственной области (с разным весом), как это для одномерной задачи иллюстрируется на рис. 1 б. Это не значит, что входной фильтр является обязательно сглаживающим. Принципиально оптимальными могут быть и дифференцирующие фильтры.

Использование в качестве отсчетов не мгновенных, а осредненных значений процесса при рациональном выборе способов осреднения и обработки результатов, как правило, позволяет заметно повысить точность измерений при той же частоте дискретизации либо уменьшить частоту (число) обрабатываемых измерений при той же точности. Получаемый количественный выигрыш в ряде случаев может быть весьма существенным [6]. Из общих соображений этот результат может быть объяснен тем, что при использовании входных фильтров привлекается дополнительная информация о непрерывном процессе, а не только о его значениях в моменты опроса.

Следует отметить, что практически мы всегда имеем дело с аналого-дискретными фильтрами, т. е. дискретные фильтры представляют собой определенную идеализацию для случаев, когда влиянием осредняющих свойств измерительного прибора можно пренебречь. В общем случае применение результатов, полученных для

дискретного фильтра, к реальным измерениям по осредняющему прибору может приводить к весьма большим погрешностям. Поэтому при нахождении характеристик процесса по ряду отсчетов необходимо знать не только соответствующие результаты измерений, но и способы их получения (весовые функции  $h_i(t)$  и их возможную нестабильность).

Задачи, связанные с обработкой дискретных отсчетов, весьма многообразны и могут существенно отличаться по своей постановке, например по виду и области определения интересующих нас характеристик процесса, характеру и числу исходных данных и т. д. Вместе с тем, как отмечалось, такие задачи имеют много общего и требуют решения одинаковых вопросов. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть подобную задачу в достаточно общем виде.

### Выбор методов осреднения и обработки, частоты, точности измерений

Обозначим желаемую характеристику изучаемого процесса для аргумента  $t$  через  $L(t)$  (рассматриваем одномерную задачу). Полагаем, что характеристика  $L(t)$  связана с  $x(t)$  некоторым линейным оператором, и будем искать эту характеристику в виде взвешенной суммы  $n$  результатов измерений  $z_1(t_i)$

$$w(t) = \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot z_1(t_i), \quad (2)$$

где

$$z_1(t_i) = z(t_i) + y_1(t_i), \quad z(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t_i - t) \cdot h_i(t) dt,$$

$$\varphi(t) = x(t) + y(t),$$

$y(t)$  и  $y_1(t)$  — погрешности, вносимые в результаты измерений на различных этапах преобразования (до и после осредняющего прибора). Учет этих погрешностей позволяет рационально выбирать требования к точности измерений.

В качестве желаемой характеристики  $L(t)$  может выступать текущее значение процесса  $x(t)$ , среднее за определенный интервал, связь  $L(t)$  с  $x(t)$  может быть задана дифференциальным уравнением и т. д.; в общем случае при синтезе системы следует исходить из минимума погрешности определения не промежуточных, а результирующих характеристик.

Выражение для среднего квадратического значения ошибки может быть записано в виде

$$\delta^2(t) = \overline{[L(t) - w(t)]^2} = \left\{ \overline{L(t)} - \sum_{i=1}^n b_i(t) \times \right.$$

$$\times \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\varphi(t')} \cdot h_i(t_i - t') dt' + \overline{y_1(t)} \right] \Bigg\}^2 + R_L(t, t) - \\ - 2 \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot R_{Lz_i}(t, t_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_i(t) \cdot b_j(t) \cdot R_{z_i}(t_i, t_j), \quad (3)$$

где  $R$  с индексом внизу обозначает соответствующий корреляционный момент,

$$R_{Lz_i}(t, t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{L\varphi}(t, t_i - t') \cdot h_i(t') dt' + R_{Ly_i}(t, t_i), \\ R_{z_i}(t_i, t_j) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\varphi}(t_i - t', t_j - t'') \cdot h_i(t') \cdot h_j(t'') dt' dt'' + \\ + R_{y_i}(t_i, t_j) + \int_{-\infty}^{\infty} h_i(t') \cdot R_{\varphi y_i}(t_i - t', t_j) dt' + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} h_j(t') \cdot R_{\varphi y_j}(t_j - t', t_i) dt'.$$

Записать выражения для корреляционных функций  $R_L(t', t'')$  и  $R_{L\varphi}(t', t'')$ , входящих в (3), нетрудно, поскольку оператор, связывающий  $L(t)$  с  $x(t)$ , принят линейным.

Использование различных функций  $h_i(t)$  может быть полезным при нестационарных процессах или существенной неравномерности отсчетов.

Для многих задач представляет интерес значение характеристики  $L(t)$  не для одной точки, а в определенной области  $C$  (задачи интерполяции и т. п.), причем требования к точности измерений могут зависеть от аргумента. В этом случае в качестве минимизируемой величины при выборе функций  $h_i(t)$  целесообразно принять осредненную дисперсию  $\delta_{\text{ср}}^2 = \int_C f(t) \cdot \delta^2(t) dt$ ,

где  $f(t)$  — весовая функция и  $\int_C f(t) dt = 1$ .

С учетом (3), полагая, что математические ожидания измеряемого процесса и погрешностей равны нулю (или что процессы центрируются), запишем:

$$\delta_{\text{ср}}^2 = \int_C R_L(t, t) \cdot f(t) dt - 2 \sum_{i=1}^n \int_C b_i(t) \cdot R_{Lz_i}(t, t_i) \cdot f(t) dt + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_C b_i(t) \cdot b_j(t) \cdot f(t) dt \cdot R_{z_i}(t_i, t_j). \quad (4)$$

Очевидно, (3) можно рассматривать как частный случай (4), когда  $f(\tau) = \delta'(t - \tau)$ , где  $\delta'$  — дельта-функция.

Выражение (4) связывает дисперсию погрешности определения заданной характеристики  $L(t)$  с  $h_i(t)$ ,  $b_i(t)$ ,  $t_i$  и статистическими характеристиками изучаемого процесса и погрешностей измерений; выражение (4) может быть использовано для решения таких методических вопросов, как выбор способа осреднения при получении отсчетов и их обработки ( $h_i(t)$  и  $b_i(t)$ ) и координат отсчетов  $t_i$  или частоты измерений, для определения влияния погрешностей  $y_i$  и  $y$  и необходимой точности измерений и т. д.

Рассматривая  $\delta_{\text{ср}}^2$  как функционал от  $n$  весовых функций, давая функции  $h_j(t)$  вариацию  $\gamma \cdot k(t)$ , дифференцируя по  $\gamma$  и приравнявая производную при  $\gamma=0$  нулю, получим

$$\int_C f(t) \cdot b_j(t) \cdot R_{L\varphi}(t, t_j - t') dt = \sum_{i=1}^n \int_C b_j(t) \cdot b_i(t) \cdot f(t) dt \times \\ \times \left[ \int_{-\infty}^{\infty} R_{\varphi}(t_j - t', t_i - t'') \cdot h_i(t'') dt'' + R_{\varphi y_i}(t_j - t', t_i) \right], \\ j=1, \dots, n. \quad (5)$$

Если весовые коэффициенты  $b_i(t)$  заданы, то оптимальные функции  $h_i(t)$  представляют собой решение системы интегральных уравнений (5). Когда характер осреднения одинаков для используемых отсчетов, оптимальная весовая функция  $h(t)$  может быть найдена из уравнения

$$\sum_{j=1}^n \int_C f(t) \cdot b_j(t) \cdot R_{L\varphi}(t, t_j - t') dt = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \int_C b_j(t) \cdot b_i(t) \times \\ \times f(t) dt \cdot \left[ \int_{-\infty}^{\infty} R_{\varphi}(t_j - t', t_i - t'') \cdot h(t'') dt'' + R_{\varphi y_i}(t_j - t', t_i) \right]. \quad (6)$$

Если в качестве критерия при выборе  $h(t)$  используется дисперсия погрешности  $\delta^2(\tau)$  для некоторого аргумента  $\tau$ , то достаточно в (6) принять  $f(t) = \delta'(t - \tau)$ . Из (5) и (6) несложно записать выражения для случая, когда процессы  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $y_i(t)$  являются стационарными. Этот случай и методы решения более подробно рассмотрены в [5].

Если аргумент  $t$  — время и в качестве значений  $t_i$  берутся моменты отсчетов, на весовые функции  $h_i(t)$  или  $h(t)$  в (5) и (6) накладывается дополнительное условие:  $h_i(t) = 0$  при  $t < 0$ . При этом в уравнениях (5) и (6) нижний предел интеграла по  $t''$  равен не  $(-\infty)$ , а нулю и  $t' \geq 0$ . Осреднение по времени осуществляется за счет динамических характеристик датчиков (и вторичных преобразователей), и оптимальный выбор способа осреднения, т. е. весовых функций  $h_i(t)$ , как правило, сводится к выбору оптимальных частотных характеристик датчиков.

В этом случае, представляющем наибольший интерес для автоматических измерений,  $h(t)$  или  $h(t, \tau)$  (при разных  $h_i$ ) — например импульсная переходная функция входного фильтра (т. е. датчика и преобразователя) с постоянными или переменными параметрами.

Для оптимального выбора способа обработки, т. е. коэффициентов  $b_i(t)$ , при известных весовых функциях  $h_i(t)$  найдем частные производные дисперсии  $\delta^2(t)$  по  $b_i$  и приравняем их нулю. При этом получим систему уравнений

$$R_{Lz_i}(t, t_i) = \sum_{j=1}^n b_{j0}(t) R_{z_i}(t_i, t_j), \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Соответствующее минимальное значение дисперсии

$$\delta_{\text{ср } 0}^2 = \int_C R_L(t, t) f(t) dt - \sum_{i=1}^n \int_C b_{i0}(t) f(t) R_{Lz_i}(t, t_i) dt.$$

Если измеряемый процесс и погрешности измерения стационарны и рассматривается случай обработки бесконечного числа равноотстоящих (с интервалом  $T$ ) отсчетов, задача упрощается и сводится к определению двух функций —  $h(t)$  и  $b(t)$ . При этом система (7) заменяется одним уравнением. Этот случай был рассмотрен в [10—12] при равном весе погрешностей для всех аргументов ( $f(t) = \frac{1}{T}$ ) и в [5] при произвольной функции  $f(t)$ .

Таким образом, при заданных координатах отсчетов задача оптимального выбора способов осреднения и обработки сводится к решению системы уравнений (5) или (6) и (7). В общем случае результат может быть получен с помощью ЭЦВМ; при этом вариационная задача рассматривается как предельная для некоторой задачи на экстремум функции конечного числа переменных. Важно отметить, что в большинстве практических случаев задача синтеза существенно упрощается и сводится не к нахождению оптимальной функции  $h(t)$  (или  $h_i(t)$ ), а к оптимизации параметров при известном виде этой функции. В частности, в метеорологической практике широко используются средние за некоторый интервал и экспоненциальное сглаживание. Здесь нужно оптимально выбрать интервал осреднения или постоянную времени. В подобных случаях может быть полезно провести сопоставление получаемой погрешности с погрешностью при оптимальном операторе осреднения, а также при более простых неоптимальных операторах, т. е. оценить целесообразность принятого приближения. Например, в ряде случаев прибор первого порядка не только проще, но и дает большую точность, чем широко используемое осреднение за некоторый интервал.

Следует подчеркнуть, что оптимальный выбор параметров функции  $h(t)$  и способа обработки результатов измерений требует учета возможной нестабильности этих параметров (отклонения их

от расчетных значений) [5, 7]. Анализ погрешности  $\delta_{\text{ср}}^2$  и синтез оптимальной системы без учета этой нестабильности могут приводить к ложным результатам.

При решении рассматриваемой задачи определяются не только оптимальные способ осреднения при получении отсчетов и способ обработки, но и соответствующая им минимально возможная (в рамках линейной задачи) результирующая погрешность при заданной шкале дискретизации (частоте измерений, густоте сети). Исследуя зависимость минимальной результирующей дисперсии  $D_m$  от дисперсий погрешностей  $y$  и  $y_1$ , можно определить влияние различных составляющих инструментальной погрешности на результирующую погрешность и рационально выбрать необходимую инструментальную точность дискретных измерений. Подобный подход представляет большой интерес для рационального выбора точности измерений на сети станций и проектирования приборов. Следует отметить, что в общем случае зависимость  $D_m$  от дисперсий погрешностей отсчетов не является линейной; в некоторых случаях даже малые погрешности отсчетов радикально влияют на величину  $D_m$  [7].

Рассматриваемый круг вопросов включает в себя также такие задачи, как выбор частоты и расположения отсчетов, числа обрабатываемых измерений, конкретных измерений при заданной шкале отсчетов и т. п. При выборе частоты, как и при выборе точности, за основу также берется зависимость от  $f$  дисперсии  $D_m$ . Помимо результирующей погрешности, необходимо учитывать также дополнительные факторы: технические характеристики измерительного устройства и устройства обработки (быстродействие, емкость запоминающего устройства и т. п.) и соответствующие затраты (экономические, сложность устройства и т. д.). В общем случае задача сводится к выбору некоторого обобщенного критерия, зависящего от затрат и результирующей погрешности, и его оптимизации; такой подход использовался в [2] применительно к вопросу о густоте метеорологической сети. Однако важно отметить, что для многих задач, связанных с наложением определенных ограничений, частота измерений, число измерений  $n$ , их расположение и т. п. могут быть найдены непосредственно из условия минимума погрешности при данных ограничениях. Например, если задано число обрабатываемых измерений  $n$ , то для определения положения отсчетов ( $t_i$ ) система уравнений (5) и (7), решаемая при синтезе, дополняется еще  $n$  уравнениями вида

$$\frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial t_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

При равномерном квантовании добавляются два уравнения:

$$\frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial t_1} = 0.$$

Рассматриваемые вопросы касаются методики как обычных, так и автоматических измерений. Полезно, однако, указать, что

в последнем случае существенно возрастают возможность и эффективность их оптимального решения. В частности, необходимые частотные характеристики ( $h(t)$ ) могут быть получены не выбором конструкции датчика, что нередко затруднительно, а с помощью вторичных преобразователей (электрических фильтров). Это позволяет повысить стабильность характеристик, скорректировать частотные характеристики используемых датчиков, применить коммутируемые, настраиваемые фильтры и т. д. Существенно возрастает также гибкость выбора шага дискретизации и обработки отсчетов. Наконец, локализуется характер решаемой задачи, что также повышает эффективность методов по сравнению с использованием одних и тех же данных для разных задач.

Как указывалось выше, задача синтеза оптимального аналого-дискретного фильтра может быть непосредственно приложена к определению репрезентативности метеорологических наблюдений.

### Репрезентативность метеорологических наблюдений

Одним из основных требований, предъявляемых к результатам метеорологических наблюдений, является их репрезентативность, под которой обычно понимается представительность не только для момента времени и точки пространства, к которым относится данный результат, но и для прилегающей пространственной и временной области. Репрезентативность измерений может обсуждаться в двух аспектах. Прежде всего — в физическом, т. е. с точки зрения правильного выбора пункта наблюдения, уменьшения влияния местных неоднородностей, подстилающей поверхности и т. д. Этим вопросам посвящено большое число методических работ, и в дальнейшем будем полагать, что с этой точки зрения используемые наблюдения удовлетворяют основным требованиям. Второй аспект — математический, заключающийся в ответе на два вопроса: какое значение должно выдаваться в качестве результата точечного наблюдения, чтобы с наименьшей погрешностью характеризовать метеорологический элемент, и какова величина этой минимальной погрешности. В ряде работ эти вопросы рассматриваются для конкретных задач, например, в [3, 4] оценивается репрезентативность результатов измерений в точке по отношению к средней по площади. Рассматриваемый в настоящей статье подход позволяет дать строгий количественный ответ на оба поставленных вопроса для общего случая.

Сама постановка задачи о представлении и репрезентативности точечных результатов метеорологических наблюдений непосредственно связана с дискретизацией непрерывного метеорологического элемента по времени и пространству. Как отмечалось, дискретизация практически всегда сопровождается потерей точности. С этой точки зрения обеспечение репрезентативности метеорологических наблюдений сводится к такому выбору результатов наблюдений, при котором эта потеря будет минимальной.

Выше было показано, что для конкретных задач, характеризующихся дискретизацией процесса и нахождением результата по ряду отсчетов, могут быть найдены оптимальные операторы осреднения метеорологического элемента по времени и пространству при получении каждого из отсчетов (в случае линейных операторов — весовые функции  $h_i(u, v, l, t)$ ), при которых погрешность решения данной задачи будет в среднем минимальной. Очевидно, оптимальным для этой задачи является использование в качестве отсчетов результатов преобразования входного сигнала (и помехи), полученных оптимальными операторами. Такие отсчеты следует рассматривать как наиболее репрезентативные (в математическом смысле) для данной задачи. Использование осреднения при получении дискретных отсчетов в общем случае позволяет повысить точность даже при отсутствии помех и инструментальных случайных погрешностей, т. е.  $y = y_1 = 0$ , хотя в сами отсчеты в этом случае вносится погрешность. Для непрерывных измерений при  $y = y_1 = 0$  задача носит тривиальный характер: оптимальным является измерение без осреднения. При наличии погрешностей и для непрерывных измерений оптимальное представление текущего результата связано с осреднением.

Как отмечалось, характер решаемых задач может быть весьма различным (по виду желаемой характеристики  $L$ , области ее определения и т. д.). На решение всегда накладываются определенные условия и ограничения (уровень помех, класс входных фильтров, их нестабильность, число и возможный способ обработки отсчетов и пр.). Очевидно, оптимальные операторы осреднения для различных задач в общем случае различны и репрезентативность результатов следует связывать с конкретной постановкой задачи. При использовании результатов точечных наблюдений для решения различных задач следует выбирать какой-либо компромиссный критерий (например, минимизировать взвешенную сумму дисперсий  $\delta_{\text{ср}}^2$  для каждой из задач) или некоторую основную задачу. В [12] в качестве последней рассмотрена задача восстановления процесса по бесконечному полю данных. При решении задач с учетом ограничений полезно рассматривать также предельную задачу (без ограничений), что позволяет оценить их влияние на результирующую погрешность (например, влияние ограничения числа обрабатываемых измерений по сравнению с использованием всех данных). Это относится и к случаю выбора не оптимальных, а более простых методов осреднения и обработки ( $b_i(t)$  и  $h(t)$ ).

Таким образом, с рассматриваемых позиций под репрезентативными для заданных точек (заданных временных и пространственных координат обрабатываемых отсчетов) понимаются результаты преобразования метеорологического процесса оптимальными входными фильтрами, полученными при синтезе оптимального для данной задачи аналого-дискретного фильтра. В ряде случаев вопрос о репрезентативности точечных измерений может быть дополнен вопросом об оптимальном выборе точек (т. е. аргументов отсчетов).

Итак, рассматриваемый подход позволяет найти оптимальный метод осреднения при производстве метеонаблюдений (оптимальную функцию  $h(t)$  или ее параметры: оптимальный интервал осреднения и т. п.) и определить минимально возможную дисперсию погрешности при выбранной или заданной шкале дискретизации (частоте измерений, густоте сети).

Следует остановиться еще на одном подходе к выбору входного фильтра. Нередко в метеорологической практике для этой цели используется разбиение известной спектральной характеристики  $s(\omega)$  процесса на «интересующую» нас область  $s_1(\omega)$  и «неинтересующую», которая рассматривается как помеха и фильтруется. Выбор частотной характеристики фильтра  $W(i\omega)$  (или способа сглаживания) может быть сделан на основе указанного деления по выражению  $s(\omega)|W(i\omega)|^2 = s_1(\omega)$ . Подобное деление искусственно и всегда в большей или меньшей степени произвольно (хотя для метеорологических процессов нередко упрощается из-за провала в среднечастотной области спектра). Рассмотрение какой-то части спектральной характеристики, несущей определенную информацию о процессе, как помехи представляется методически неверным.

Приведенные выше рассуждения позволяют при дискретизации процесса во времени или в пространстве найти оптимальный входной фильтр без необходимости произвольного деления спектра на «нужную» и «ненужную» части. В данном случае также имеет место преобразование спектра процесса, но при этом исключается отмеченный выше «произвол» и достигается минимум погрешности при заданной шкале дискретизации. Полученное преобразование спектра (вынужденное ограниченными возможностями отбора информации в связи с дискретизацией, а не тем, что выделяемая часть спектра считается «нужной») является оптимальным для данной задачи.

### Погрешность воспроизведения процесса по дискретным отсчетам осредняющих приборов

Выше обсуждалась общая задача нахождения желаемой характеристики  $L(t)$  процесса  $x(t)$  по взвешенной сумме отсчетов  $z_1(t_i)$ . Примем  $L(t) = x(t)$ , т. е. рассмотрим задачу восстановления процесса по результатам дискретных наблюдений по осредняющему прибору. Подобная задача для случая безынерционного прибора подробно рассмотрена в литературе.

Полагая  $y = y_1 = 0$  и измеряемый процесс  $x(t)$  стационарным, согласно (3) запишем

$$\begin{aligned} \delta^2(t) = & R_x(0) - 2 \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot R_{xz}(t - t_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_i(t) \cdot b_j(t) \times \\ & \times R_z(t_i - t_j) + \left[ 1 - \int_0^\infty h(t) dt \cdot \sum_{i=1}^n b_i(t) \right]^2 \cdot M_x^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$R_z(\tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h(t') \cdot h(t'') \cdot R_x(\tau - t' + t'') dt' dt'',$$

$$R_{xz}(\tau) = \int_0^{\infty} h(t') \cdot R_x(\tau + t') dt'$$

— соответственно автокорреляционная функция процесса  $z(t) = \int_0^{\infty} x(t - t') h(t') dt'$  на выходе инерционного измерительного прибора с импульсной переходной функцией  $h(t)$  и взаимная корреляционная функция процессов  $x(t)$  и  $z(t)$ . Примем также, что математическое ожидание  $M_x = 0$ .

Рассмотрим некоторые наиболее простые методы восстановления сигнала и сопоставим результаты, получаемые для осредняющего и безынерционного приборов. Основное внимание уделено случаю, когда  $h(t) = \frac{1}{T_{\Phi}} e^{-\frac{t}{T_{\Phi}}}$ ,  $t \geq 0$ , т. е. используется аperiodический прибор первого порядка. Этот случай представляет практический интерес; вместе с тем получаемые результаты достаточно просты и удобны для иллюстрации общих положений.

Очевидно, при стационарном процессе  $x(t)$  погрешность  $\varepsilon(t)$  восстановления процесса по отсчетам не является стационарной. Примем, что дискретизация процесса — равномерная с интервалом между отсчетами, равным  $T$ , и что выбираемые  $n$  отсчетов используются для нахождения  $x(t)$  в некотором интервале  $(t, t+T)$ , определенным образом расположенном относительно отсчетов; при переходе к соседнему интервалу  $T$  соответственно сдвигаются и выбираемые отсчеты. В этом случае для стационарного процесса  $x(t)$  дисперсия  $\delta^2(t)$  является периодической функцией с периодом  $T$ ; в отличие от измерений безынерционным прибором погрешность в моменты отсчетов не равна нулю. В зависимости от задачи может представлять интерес значение максимальной дисперсии  $\delta^2_{\max}$

или взвешенной осредненной дисперсии  $\delta^2_{\text{ср}} = \int_0^T f(t) \delta^2(t) dt$ .

В дальнейшем используется последний критерий при  $f(t) = \frac{1}{T}$ .

Интерполяция и экстраполяция по одному отсчету. Для рассматриваемого случая в уравнении (9)  $n=1$ , т. е. значение  $x(t)$  в интервале  $(t_1 + t_i, t_1 + T_1 + T)$  определяется по выражению  $w(t) = b(t) z(t_1)$ . Примем для простоты записи  $t_1 = 0$ . Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. *Ступенчатая интерполяция.* Если способ обработки измерений (т. е. коэффициенты  $b_i(t)$ ) не зависит от  $h(t)$ , то оптимальная функция  $h(t)$  определяется выражением (6). Для рассматриваемого

мого случая с учетом (9) это выражение можно переписать в виде

$$F_1(t') = \int_0^{\infty} F_2(t' - t'') h(t'') dt'', \quad t' \geq 0. \quad (10)$$

При  $n=1$  в (10)

$$F_2(\tau) = \int_{T_1}^{T_1+T} b(t) f(t) R_x(t+\tau) dt,$$

$$F_2(\tau) = R_x(\tau) \cdot \int_{T_1}^{T_1+T} b^2(t) f(t) dt.$$

Примем, что коэффициент  $b(t)$  не зависит от  $t$  (и равен  $b$ ). Примем также, что на  $h(t)$  никаких ограничений не накладывается, тогда в (10) нижний предел интегрирования равен  $(-\infty)$  и не накладывается ограничений на  $t'$ . С учетом принятых допущений, находя преобразование Фурье от обеих частей выражения

(10), при  $f(t) = \frac{1}{T}$  получим

$$b\Phi_0(j\omega) = \frac{e^{j\omega(T_1+T)} - e^{j\omega T_1}}{j\omega T}, \quad (11)$$

где  $\Phi_0(j\omega)$  — преобразование Фурье оптимальной весовой функции  $h_0(t)$  (если  $t$  — время,  $\Phi_0(j\omega)$  — например, оптимальная передаточная функция осредняющего прибора).

Выражение (11) соответствует прибору, реализующему зависи-

мость  $b \cdot z(t) = \frac{1}{T} \int_{t+T_1}^{t+T_1+T} x(t) dt$ . Таким образом, независимо от стати-

стических характеристик измеряемого процесса минимум осредненной дисперсии  $\delta_{\text{ср}}^2$  погрешности ступенчатой экстраполяции результата измерения на произвольный интервал  $(T_1, T_1+T)$  имеет место при выборе в качестве этого результата среднего значения процесса за указанный интервал. Такой отсчет является наиболее репрезентативным для рассматриваемой задачи.

Указанный вывод можно получить и другим способом. Рассмотрим погрешность нахождения среднего значения за рассма-

триваемый интервал  $L_4(t_1) = \frac{1}{T} \int_{t_1+T_1}^{t_1+T_1+T} x(t) dt$  по отсчету по

инерционному прибору в момент  $t_1$ . Имеем

$$\begin{aligned} \delta^2(t_1) &= \left[ \frac{1}{T} \int_{t_1+T_1}^{t_1+T_1+T} x(t) dt - b \int_0^\infty x(t_1-t') \cdot h(t') dt' \right]^2 = \\ &= \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T R_x(t'-t'') dt' dt'' - \frac{2b}{T} \int_{T_1}^{T_1+T} \int_0^\infty R_x(t+t') \cdot h(t') \times \\ &\quad \times dt' dt + b^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h(t') \cdot h(t) \cdot R_x(t-t') dt' dt + \\ &\quad + M_x^2 \left[ 1 - \int_0^\infty h(t) dt \right]^2 = \delta_{cp}^2 - R_x(0) + \frac{2}{T^2} \int_0^T (T-t) \cdot R_x(t) dt, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\delta_{cp}^2$  — рассматриваемая выше осредненная (при  $f(t) = \frac{1}{T}$ ) дисперсия ступенчатой экстраполяции.

Из (12) следует, что независимо от расположения рассматриваемого интервала, статистических характеристик процесса  $x(t)$  и ограничений, накладываемых на  $h(t)$ , минимум дисперсий  $\delta^2(t_1)$  и  $\delta_{cp}^2$  имеет место при одном и том же выборе функции  $h(t)$  или ее параметров. Этот вывод представляет самостоятельный интерес. Для случая, когда  $h(t)$  соответствует осреднению с равным весом за некоторый интервал, этот вывод был получен в работе [9].

Если на  $h(t)$  никаких ограничений не накладывается, то  $\delta^2(t_1)$  достигает своего минимального значения (равного нулю), когда за отсчет принимается само значение  $L_1(t_1)$ . При этом и  $\delta_{cp}^2$  достигает минимума. Таким образом, мы пришли к выводу, полученному выше. Если  $t$  — время, то этот вывод пригоден при  $T_1+T < 0$ .

С учетом условия физической реализуемости:  $h(t) = 0$  при  $t < 0$  решение уравнения (10) имеет вид [8]

$$\Phi_0(j\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(\omega)} \int_0^\infty e^{-j\omega t} dt \int_{-\infty}^\infty \frac{s_{F_1}(\omega)}{\psi^*(\omega)} e^{j\omega t} d\omega, \quad (13)$$

где  $s_{F_1}(\omega)$  и  $s_{F_2}(\omega)$  — преобразования Фурье функций  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$ ,  $\psi(\omega)$  и  $\psi^*(\omega)$  — комплексно-сопряженные функции, определяемые из соотношения  $\psi(\omega) \cdot \psi^*(\omega) = s_{F_2}(\omega)$ .

Для случая ступенчатой экстраполяции (при  $T_1 \geq 0$ ) получим

$$b \cdot \Phi_0(j\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(\omega)} \int_0^\infty e^{-j\omega t} dt \int_{-\infty}^\infty \psi(\omega) \frac{e^{j\omega t}}{j\omega T} [e^{j\omega(T_1+T)} - e^{j\omega T_1}] d\omega, \quad (13')$$

где  $|\psi(\omega)|^2 = s_x(\omega)$ ,  $s_x(\omega)$  — спектральная характеристика процесса  $x(t)$ .

Примем, что  $R_x(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-a_i |t|}$ . В этом случае  $s_x(\omega)$  — дробно-рациональная функция, и несложно получить аналитическое решение (13'). Например, если  $\psi(\omega)$  можно представить в виде  $\psi(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\omega - ja_i}$ , то получим

$$b \cdot \Phi_0(j\omega) = \frac{1}{\psi(\omega)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\omega - ja_i} [e^{-a_i(T_1+T)} - e^{-a_i T_1}], \quad (14)$$

где  $c_i$  находятся из выражения  $\frac{1}{jT\omega} \psi(\omega) = \frac{c_0}{\omega} + \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\omega - ja_i}$ .

В частности, при  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$  получим

$$b \cdot \Phi_0(j\omega) = \frac{1}{aT} [e^{-aT_1} - e^{-a(T_1+T)}], \quad (14')$$

т. е. в этом случае оптимальным является безынерционный прибор. При  $R_x(t) = A_1 e^{-a_1|t|} + A_2 e^{-a_2|t|}$

$$b \cdot \Phi_0(j\omega) = k \frac{\omega + jd_1}{\omega + jd_2},$$

где  $k$ ,  $d_1$  и  $d_2$  определяются по  $A_1$ ,  $a_1$ ,  $A_2$  и  $a_2$ . В частности, при  $A_1 a_1 + A_2 a_2 = 0$  (что соответствует дифференцируемому процессу)  $b \cdot \Phi_0(j\omega) = jk\omega + d$ , т. е. здесь оптимальным является взвешенное суммирование сигнала и его производной в момент отсчета.

Запишем выражение для дисперсии  $\delta_{cp}^2$  при получении отсчета по аperiodическому прибору первого порядка:

$$\begin{aligned} \delta_{cp}^2 = R_x(0) - \frac{2b}{TT_\Phi} \int_{T_1}^{T_1+T} \int_0^\infty e^{-\frac{t'}{T_\Phi}} R_x(t+t') dt' dt + \\ + \frac{b^2}{T_\Phi} \int_0^\infty R_x(t) e^{-\frac{t}{T_\Phi}} dt. \end{aligned} \quad (15)$$

Из (15) для конкретного вида корреляционной функции  $R_x(t)$  несложно найти оптимальное значение постоянной времени  $T_\Phi$  при заданных  $T_1$ ,  $T$  и параметрах функции  $R_x(t)$ .

Некоторые общие выводы могут быть получены, если исследовать поведение зависимости  $\delta_{cp}^2$  от  $T_\Phi$  при малых  $T_\Phi$  для произвольной функции  $R_x(t)$ . При  $b=1$  из (15) получим

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial \delta_{cp}^2}{\partial T_\Phi} = R'_x(0) \pm \frac{2[R_x(T) - R_x(0)]}{T}, \quad (16)$$

где  $R'_x(0)$  — предел производной  $\frac{dR_x(t)}{dt}$  при  $t \rightarrow 0$  справа, знак (+) соответствует  $T_1 = T$ , а знак (—) соответствует  $T_1 = 0$ .

Как следует из свойств корреляционных функций, производная  $R'_x(0) \leq 0$ , а дисперсия  $R_x(0) \geq R_x(T)$ . Таким образом, производ-

ная  $\frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_{\Phi}}$  при  $T_{\Phi}=0$  при интерполяции на предшествующий рассматриваемому отсчету интервал ( $T_1 = -T$ ) практически всегда отрицательна, т. е. практически независимо от вида функции  $R_x(t)$  и интервала между отсчетами  $T$  дисперсия  $\delta_{\text{ср}}^2$  в окрестности точки  $T_{\Phi}=0$  убывает с возрастанием  $T_{\Phi}$  и, следовательно, аperiодический прибор при разумном выборе  $T_{\Phi}$  всегда дает бoльшую точность по сравнению с безынерционным прибором (уменьшает  $\delta_{\text{ср}}^2$ , хотя и искажает результат в момент отсчета). Поскольку при  $T_{\Phi} \rightarrow \infty$   $\delta_{\text{ср}}^2 \rightarrow R_x(0)$ , зависимость  $\delta_{\text{ср}}^2$  от  $T_{\Phi}$  имеет минимум при конечном  $T_{\Phi} \neq 0$ .

При экстраполяции на следующий за отсчетом интервал ( $T_1 = 0$ ) для широкого класса процессов, у которых  $R'_x(0) = 0$ ,  $\delta_{\text{ср}}^2$  возрастает в окрестности точки  $T_{\Phi}=0$ . Полученный вывод, конечно, не означает, что для всех подобных процессов инерционный прибор дает меньшую точность, чем безынерционный, поскольку дальнейший ход зависимости  $\delta_{\text{ср}}^2(T_{\Phi})$  не исследуется, но для гладких процессов при  $T$ , значительно меньшем интервала корреляции процесса, это, как правило, имеет место. Причина этого в том, что используемый тип входного фильтра весьма далек от оптимального для данной задачи (здесь нужен элемент прогноза, т. е. не запаздывающий, а дифференцирующий или интегро-дифференцирующий фильтр).

При  $R'_x(0) \neq 0$  и  $T_1=0$  выражение (16) не позволяет дать общий ответ о знаке производной  $\delta_{\text{ср}}^2$  по  $T_{\Phi}$  при  $T_{\Phi}=0$ . В частности, при  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$  эта производная отрицательна при  $\beta = aT > 1,59$  и положительна при  $\beta < 1,59$ , т. е. осредняющий прибор позволяет повысить точность измерения для относительно (при данном  $T$ ) быстрых процессов. При  $R_x(t) = \sigma_x^2 [1 - A \cdot |t|^n]$  из (16) следует, что точность повышается только при  $n < 1$ . Близкая задача (экстраполяция при  $b(t) = 1$ , но по прибору, реализующему среднее за некоторый предшествующий интервал  $\theta$ ) была рассмотрена в [9]. При этом для степенной структурной функции был получен аналогичный вывод: осреднение (т. е.  $\theta \neq 0$ ) может дать выигрыш в точности при  $n < 1$ ; при  $n > 1$  оптимальным является использование безынерционного прибора ( $\theta = 0$ ). Сопоставление погрешности различных методов восстановления по отсчетам приборов этих двух типов представляет самостоятельный интерес.

2. *Оптимальная интерполяция.* Рассмотрим погрешность интерполяции и экстраполяции при оптимальном выборе весового коэффициента  $b(t)$ .

Из (9) при  $M_x=0$  получим:  $b_{\text{опт}}(t) = \frac{R_{xz}(t)}{R_z(0)}$ ,

$$\delta_{\text{ср}}^2 = R_x(0) - \frac{1}{TR_z(0)} \int_0^{T_1+T} R_{xz}^2(t) dt. \quad (17)$$

При использовании аperiodического прибора первого порядка,  $T_1 = -T$  и  $T_1 = 0$  получим

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_\Phi} = \frac{R'_x(0)}{T \cdot R_x^2(0)} \int_0^T R_x^2(t) dt \pm \frac{R_x^2(T) - R_x^2(0)}{T \cdot R_x(0)}. \quad (18)$$

Очевидно, здесь могут быть сделаны те же качественные выводы, что и выше; в частности, при интерполяции инерционный прибор при рациональном выборе  $T_\Phi$  позволяет повысить точность по сравнению с безинерционным (независимо от  $R_x(t)$  и  $T$ ).

Для  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$  и рассматриваемых случаев (интерполяции при  $b(t) = 1$  и  $b(t) = b_{\text{опт}}(t)$  и экстраполяции при том же выборе  $b(t)$ ) получим:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ср}}^2 &= \sigma_x^2 \left[ 1 - \frac{2(1 - e^{-\beta})}{\beta(1 - \beta\alpha)} - \frac{4\beta\alpha^2(1 - e^{-\frac{1}{\alpha}})}{\beta^2\alpha^2 - 1} + \frac{1}{\beta\alpha + 1} \right], \\ \delta_{\text{ср}}^2 &= \sigma_x^2 \left[ 1 - \frac{(\beta\alpha + 1)(1 - e^{-2\beta})}{2\beta(1 - \beta\alpha)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{-2\beta^2\alpha^3(1 - e^{-\frac{2}{\alpha}}) + 4\beta\alpha^2(1 - e^{-\beta - \frac{1}{\alpha}})}{(1 - \beta^2\alpha^2)(1 - \beta\alpha)} \right], \\ \delta_{\text{ср}}^2 &= \sigma_x^2 \left[ 1 - \frac{2(1 - e^{-\beta})}{\beta(1 + \beta\alpha)} + \frac{1}{1 + \beta\alpha} \right], \\ \delta_{\text{ср}}^2 &= \sigma_x^2 \left[ 1 - \frac{1 - e^{-2\beta}}{2\beta(1 + \beta\alpha)} \right], \end{aligned}$$

где  $\beta = aT$ ,  $\alpha = \frac{T_\Phi}{T}$ . Пример зависимости  $D_{\text{ср}} = \frac{\delta_{\text{ср}}^2}{\sigma_x^2}$  от  $\alpha$  (при  $\beta = 1$ ) для указанных четырех случаев приведен на рис. 2 (кривые 1-4).

При  $b(t) = b_{\text{опт}}(t)$  и  $T_1 = 0$  минимум  $\delta_{\text{ср}}^2$  имеет место при  $T_\Phi = 0$  (независимо от  $T$  и  $a$ ). Это справедливо и при  $b$ , равном не еди-

нице, а оптимальному его значению  $\frac{1}{TR_z(0)} \int_0^T R_{xz}(t) dt$ . Последний вывод совпадает с полученным выше результатом, что при  $b(t) = b$  и  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$   $\Phi_o(j\omega) \cdot b = \frac{1}{aT} (1 - e^{-aT})$  (выражение (14')).

Интерполяция по двум отсчетам. В качестве примера более точных способов восстановления процесса рассмотрим различные варианты интерполяции по двум точкам. В этом случае значения  $x(t)$  в интервале  $0 \leq t \leq T$  определяются по взвешенной сумме отсчетов на краях интервала, т. е.  $w(t) = b_0(t)z(0) + b_1(t)z(T)$ . Дисперсия  $\delta^2(t)$  определяется выражением (9) при  $n=2$ .

1. *Линейная интерполяция.* Это один из наиболее распространенных способов восстановления процесса по его отсчетам. Рассматриваемая нами задача отличается от обычной тем, что в качестве отсчетов используются значения не самого восстанавливаемого процесса  $x(t)$ , а процесса  $z(t)$ , полученного в результате преобразования  $x(t)$  инерционным прибором.

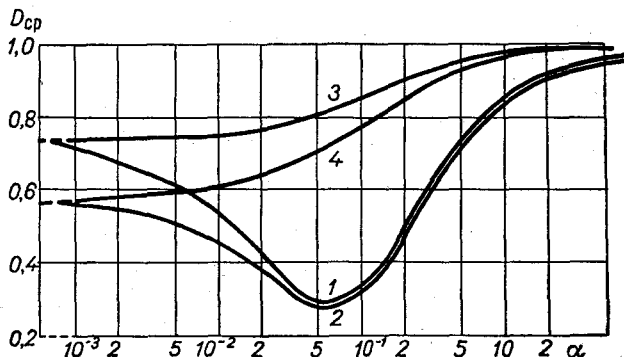


Рис. 2.

Для данного случая  $b_0(t) = 1 - \frac{t}{T}$ ,  $b_1(t) = \frac{t}{T}$  и при  $f(t) = \frac{1}{T}$  имеем

$$\begin{aligned} \delta_{cp}^2 = & \frac{1}{T} \int_0^T \delta^2(t) dt = R_x(0) + \frac{2}{3} R_z(0) + \frac{1}{3} R_z(T) - \\ & - \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{t}{T}\right) [R_{xz}(t) + R_{xz}(-t)] dt. \end{aligned} \quad (19)$$

Оптимальная функция  $\Phi_0(j\omega)$  (например, передаточная функция прибора) может быть определена из (10), при этом

$$\begin{aligned} F_1(t') &= \frac{1}{T} \sum_{i=0}^1 \int_0^T b_i(t) \cdot R_x(t - t_i + t') dt, \\ F_2(t') &= \frac{1}{T} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 R_x(t_i - t_j + t') \cdot \int_0^T b_i(t) \cdot b_j(t) dt, \quad t_0=0, \quad t_1=T. \end{aligned}$$

Если на  $h(t)$  никаких ограничений не накладывается, получим:

$$\Phi_0(j\omega) = \frac{6(1 - \cos \omega T)}{T^2 \omega^2 (2 + \cos \omega T)}.$$

Найденная функция  $\Phi_0(j\omega)$  не зависит от  $R_x(t)$ , но для ее точной реализации необходим аналоговый дискретный фильтр (с обработкой бесконечного числа отсчетов через интервал  $T$ ).

Рассмотрим случай апериодического прибора первого порядка. Для этого случая, подставляя в (19) выражения для  $R_x(t)$  и  $R_{xx}(t)$  и сводя двойные интегралы к однократным, получим:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ср}}^2 = & R_x(0) - \frac{2}{T} \int_0^T R_x(t) \left[ 2 - \frac{2t}{T} - e^{-\frac{t}{T_\Phi}} + \frac{T_\Phi}{T} \left( e^{-\frac{T-t}{T_\Phi}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-\frac{T-t}{T_\Phi}} \right) \right] dt + \frac{1}{3T_\Phi} \int_0^\infty [R_x(t+T) + R_x(t-T)] e^{-\frac{t}{T_\Phi}} dt + \\ & + \left[ \frac{2}{3T_\Phi} + \frac{4T_\Phi}{T^2} \left( 1 - e^{-\frac{T}{T_\Phi}} \right) \right] \cdot \int_0^\infty R_x(t) e^{-\frac{t}{T_\Phi}} dt. \end{aligned} \quad (20)$$

Из (20) найдем производную  $\frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_\Phi}$  при  $T_\Phi = 0$ :

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_\Phi} = \frac{2}{3} R'_x(0). \quad (21)$$

Из (21) следует, что для широкого класса недифференцируемых процессов, у которых  $R'_x(0) \neq 0$ , использование апериодического прибора позволяет повысить точность независимо от  $T$  и вида  $R_x(t)$ . Можно отметить, что для линейной экстраполяции этот общий вывод несправедлив.

При  $R'_x(0) = 0$  для исследования поведения функции  $\delta_{\text{ср}}^2(T_\Phi)$  в окрестности точки  $T_\Phi = 0$  следует найти вторую производную дисперсии  $\delta_{\text{ср}}^2$  по  $T_\Phi$ . Из (20) имеем

$$\begin{aligned} \lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial^2 \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_\Phi^2} = & -\frac{8}{T} \int_0^T \left( 1 - \frac{t}{T} \right) R''_x(t) dt + \frac{4}{3} R''_x(0) + \\ & + \frac{2}{3} R''_x(T) - \frac{8}{T} R'_x(0), \end{aligned} \quad (22)$$

где  $R''_x(t)$  — вторая производная функции  $R_x(t)$  (при  $t=0$  берется предел при  $t \rightarrow 0$  справа). Для дифференцируемого случайного процесса правая часть (22) может быть записана в виде

$$4\delta_{L_1}^2 - \frac{4}{3} R_{x_1}(0) - \frac{2}{3} R_{x_1}(T),$$

где  $x_1(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ , а  $R_{x_1}(t)$  и  $\delta_{L_1}^2$  — корреляционная функция производной процесса и дисперсия среднего значения производной за интервал  $T$ . Из последнего выражения следует, что для любой

функции  $R_x(t)$  при достаточно большом  $T$  производная  $\frac{\partial^2 \delta_{\text{ср}}^2}{\partial T_\Phi^2}$  при

$T_\Phi = 0$  отрицательна, а при достаточно малом  $T$  — положительна, т. е. для процесса, имеющего производную, в зависимости от  $T$  и  $R_x(t)$  дисперсия  $\delta_{cp}^2$  при  $T_\Phi = 0$  может иметь максимум или минимум.

2. *Линейная интерполяция с коррекцией.* Для медленно меняющегося за интервал  $T$  дифференцируемого процесса (либо низкочастотной составляющей процесса) инерция прибора увеличивает погрешность линейной интерполяции. Это связано с запаздыванием, вносимым апериодическим прибором. Для коррекции этой погрешности воспользуемся следующим методом. Для прибора первого порядка процесс на выходе прибора  $z(t)$  связан с  $x(t)$  соотношением

$$T_\Phi \frac{dz(t)}{dt} + z(t) = x(t).$$

Очевидно, для восстановления процесса  $x(t)$  достаточно просуммировать процесс  $z(t)$  и его производную (умноженную на  $T_\Phi$ ). При линейной интерполяции для нахождения последней в интервале  $(0, T)$  воспользуемся выражением  $z'(t) \approx \frac{z(T) - z(0)}{T}$ .

Оценка  $w(t)$  с учетом коррекции имеет вид

$$w(t) = z(0) \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) + z(T) \frac{t}{T} + \frac{T_\Phi}{T} [z(T) - z(0)],$$

т. е.  $b_0(t) = 1 - \frac{t}{T} - \frac{T_\Phi}{T}$  и  $b_1(t) = \frac{t}{T} + \frac{T_\Phi}{T}$ .

Подставляя приведенные значения  $b_0(t)$  и  $b_1(t)$  в выражение (9) и учитывая, что для апериодического прибора первого порядка [6]

$$R_z(0) - R_z(T) = \frac{1}{2T_\Phi} \int_0^T [R_{xz}(t-T) - R_{xz}(t)] dt,$$

получим

$$\begin{aligned} \delta_{cp_2}^2 &= \delta_{cp_1}^2 - \frac{2T_\Phi^2}{T^2} [R_z(0) - R_z(T)] = \delta_{cp_1}^2 - \\ &- \frac{T_\Phi}{T^2} \left\{ \left(2 - e^{-\frac{T}{T_\Phi}} - e^{\frac{T}{T_\Phi}}\right) \int_0^\infty R_x(t) e^{-\frac{T}{T_\Phi}} dt + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^T R_x(t) \left(e^{\frac{T-t}{T_\Phi}} - e^{-\frac{T-t}{T_\Phi}}\right) dt \right\}, \end{aligned} \quad (23)$$

где  $\delta_{cp_1}^2$  — дисперсия погрешности при линейной интерполяции без коррекции, определяемая выражением (20). Из (23) следует, что независимо от постоянной времени  $T_\Phi$ , интервала  $T$  и корреляционной функции  $R_x(t)$   $\delta_{cp_2} \leq \delta_{cp_1}$ , т. е. используемая простая коррекция практически всегда приводит к повышению точности.

Анализируя (23), несложно убедиться, что значение первой производной  $\delta_{\text{ср}2}^2$  по  $T_\Phi$  при  $T_\Phi = 0$  определяется выражением (21), а

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial^2 \delta_{\text{ср}2}^2}{\partial T_\Phi^2} = \lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial^2 \delta_{\text{ср}1}^2}{\partial T_\Phi^2} - \frac{4}{T^2} [R_x(0) - R_x(T)]. \quad (24)$$

Таким образом, при  $R'_x(0) \neq 0$ , как и выше, использование рационально выбранного осредняющего прибора обеспечивает выигрыш в точности (причем больший, чем при линейной интерполяции). Для дифференцируемых процессов нельзя сделать общий вывод, но, очевидно, максимум зависимости  $\delta_{\text{ср}}^2(T_\Phi)$  при  $T_\Phi = 0$  будет наблюдаться в большем числе ситуаций, поскольку в правой части (24) второе слагаемое при всех  $R_x(t)$  и  $T$  меньше или равно нулю.

Рассмотрим два примера. При  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$

$$D_{\text{ср}1} = \frac{\delta_{\text{ср}1}^2}{\sigma_x^2} = 1 - \frac{4}{\beta} + \frac{4}{\beta^2} + \frac{4a^2}{\beta a + 1} + \frac{2}{3(\beta a + 1)} - \\ - \frac{e^{-\beta}}{1 - \beta^2 a^2} \left( \frac{4}{\beta^2} - \frac{1}{3} \right) - \frac{\beta a e^{-\frac{1}{a}}}{1 - \beta^2 a^2} \left( \frac{1}{3} - 4a^2 \right), \quad (25)$$

$$D_{\text{ср}2} = \frac{\delta_{\text{ср}2}^2}{\sigma_x^2} = D_{\text{ср}1} - \frac{2\beta a^2}{1 - \beta^2 a^2} \left[ \frac{1 - e^{-\beta}}{\beta} - a \left( 1 - e^{-\frac{1}{a}} \right) \right]. \quad (26)$$

Здесь для обоих случаев зависимость  $D_{\text{ср}}$  от  $T_\Phi$  при всех  $\beta$  имеет минимум при конечном  $T_\Phi \neq 0$ .

При

$$R_x(t) = \frac{\sigma_x^2}{1-k} \left[ e^{-a|t|} - k e^{-\frac{a}{k}|t|} \right], \quad k < 1$$

(что соответствует процессу, имеющему производную) минимум может иметь место как при  $T_\Phi = 0$ , так и при  $T_\Phi \neq 0$  (в зависимости от  $\beta = aT$  и  $k$ ). Дисперсия  $\delta_{\text{ср}}^2$  для этого случая может быть записана как сумма выражений вида (25) или (26). При  $k \rightarrow 1$  получим  $D_{\text{ср}}$  для случая

$$R_x(t) = \sigma_x^2 (1 + a|t|) e^{-a|t|}.$$

На рис. 3 приведены зависимости  $\delta_{\text{ср}}^2$  от  $\alpha = \frac{T_\Phi}{T}$  для рассмотренной функции  $R_x(t)$  (при  $\beta = 0,1$ ) для линейной интерполяции с коррекцией (кривые 2 и 3 для  $k=0$  и  $k=0,99$ ) и без нее (кривые 1 и 4). Очевидно, при больших  $T_\Phi$  выигрыш в точности при использовании коррекции очень существенный.

Для линейной интерполяции независимо от вида  $R_x(t)$   
 $\lim_{T_\Phi \rightarrow \infty} \delta_{\text{ср}}^2 = \sigma_x^2$ . С учетом того, что для звена первого порядка [6]

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow \infty} \frac{2T_\Phi^2}{T^2} [R_z(0) - R_z(T)] = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T-t) R_x(t) dt = \delta_L^2,$$

из (23) для интерполяции с коррекцией получим

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow \infty} \delta_{\text{ср}2}^2 = \sigma_x^2 - \delta_L^2, \quad (27)$$

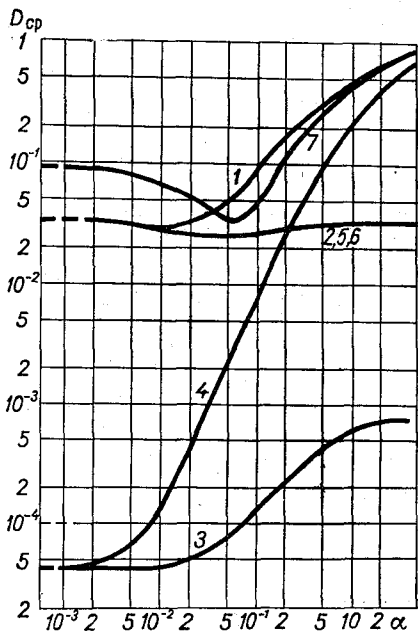


Рис. 3.

где  $\delta_L^2$  — дисперсия среднего за интервал  $T$  значения процесса  $x(t)$ .

Из (23) и (27) следует, что при  $T_1 \rightarrow 0$   $\delta_{\text{ср}2}^2 \rightarrow 0$  независимо от  $R_x(t)$  и  $T_\Phi$  (для стабильного  $T_\Phi$  даже при  $T_\Phi \rightarrow \infty$ ), т. е. эффективность коррекции может быть очень существенна.

3. *Оптимальная интерполяция по двум отсчетам.* Если требование нормировки весов не налагается, оптимальные коэффициенты  $b_0(t)$  и  $b_1(t)$  могут быть определены из системы двух уравнений:

$$\frac{\partial \delta^2(t)}{\partial b_i} = 0, \quad i=0, 1. \text{ Полагая } M_x = 0, \text{ из (9) получим}$$

$$b_{i \text{ опт}}(t) = \frac{R_z(0)}{R_z^2(0) - R_z^2(T)} \times \\ \times R_{xz}(t - iT) - \frac{R_z(T)}{R_z^2(0) - R_z^2(T)} \times \\ \times R_{xz}(t - T - iT), \quad i=0, 1.$$

Несложно аналогично определить  $b_{i \text{ опт}}(t)$  с учетом условия нормировки весов:  $b_0(t) + b_1(t) = 1$  (обычно принимаемого при  $M_x \neq 0$ ). Здесь в обоих случаях весовые коэффициенты зависят не только от способа осреднения при получении отсчета, как это было в предыдущем случае, но и от статистических характеристик процесса.

Дисперсия оптимальной интерполяции с условием нормировки весов и без него имеет вид:

$$\delta^2(t) = R_x(0) + \frac{R_z(0) + R_z(T)}{2} - \frac{[R_{xz}(t) - R_{xz}(t-T)]^2}{2[R_z(0) - R_z(T)]} - \\ - R_{xz}(t) - R_{xz}(t-T), \quad (28) \\ \delta^2(t) = R_x(0) - \frac{R_z(0)}{R_z^2(0) - R_z^2(T)} [R_{xz}(t) - R_{xz}(t-T)]^2 -$$

$$-\frac{2R_{xz}(t)R_{xz}(t-T)}{R_z(0)-R_z(T)}. \quad (29)$$

Рассмотрим случай аperiodического прибора первого порядка. Значение производной дисперсии  $\delta_{\text{cp}}^2$  по  $T_\Phi$  при  $T_\Phi=0$  (при

$f(t) = \frac{1}{T}$ ) для двух рассматриваемых вариантов равно:

$$\lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial \delta_{\text{cp}}^2}{\partial T_\Phi} = R'_x(0) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{\int_0^T [R_x(t) - R_x(T-t)]^2 dt}{2T [R_x(0) - R_x(T)]^2} \right\}, \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \lim_{T_\Phi \rightarrow 0} \frac{\partial \delta_{\text{cp}}^2}{\partial T_\Phi} = \frac{R'_x(0)}{T} & \left\{ \frac{1}{R_x^2(0) - R_x^2(T)} \int_0^T [R_x(t) - R_x(t-T)]^2 dt + \right. \\ & \left. + \frac{2}{[R_x(0) + R_x(T)]^2} \int_0^T R_x(t) R_x(t-T) dt \right\}. \end{aligned} \quad (31)$$

Из (30) следует, что при  $R'_x(0) \neq 0$  рационально выбранный инерционный прибор позволяет повысить точность. В (31) нужен дополнительный анализ знака выражения в фигурной скобке. При  $R'_x(0) = 0$  требуется более подробное исследование.

В качестве примера приведем выражение для  $\delta_{\text{cp}}^2$  при  $R_x(t) = \sigma_x^2 e^{-a|t|}$  (без нормировки весов):

$$\begin{aligned} D_{\text{cp}} = 1 - \frac{(1 - e^{-2\beta})(\beta^2 \alpha^2 + 1) - 2\beta^2 \alpha^2 (1 - e^{-\beta}) \left(1 + e^{-\frac{1}{\alpha}}\right)}{\beta(1 + \beta\alpha) \left[ (1 - \beta\alpha)^2 - \left(e^{-\beta} - \beta\alpha e^{-\frac{1}{\alpha}}\right)^2 \right]} - \\ - \frac{2\beta\alpha^2}{\beta^2 \alpha^2 - 1} - \frac{2e^{-\beta} \left( \beta\alpha e^{-\frac{1}{\alpha}} - e^{-\beta} \right)}{(1 - \alpha\beta)^2 - \left( e^{-\beta} - \alpha\beta e^{-\frac{1}{\alpha}} \right)^2} + \\ + \frac{2\beta\alpha^2 \left( e^{-\frac{1}{\alpha}} - e^{-\beta} \right)}{(\alpha^2 \beta^2 - 1) \left( 1 - \beta\alpha + e^{-\beta} - \beta\alpha e^{-\frac{1}{\alpha}} \right)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Рассмотрим случай  $\beta \ll 1$ , чему соответствует относительно малое изменение процесса за интервал  $T$ . Этот случай представляет наибольший практический интерес, поскольку для сравнительно точного восстановления процесса число измерений за интервал корреляции должно приниматься достаточно большим (и, следовательно,  $\beta = aT \ll 1$ ).

Для безынерционного прибора ( $T_\Phi = \alpha = 0$ ) из (25) и (32) при  $\beta \ll 1$  получим  $\delta_{\text{cp}}^2 \approx \sigma_x^2 \frac{\beta}{3}$ , т. е. в данном случае оптимальная интерполяция не дает сколько-нибудь заметного выигрыша по

сравнению с линейной. Величина погрешности  $\delta_{\text{ср}}$  пропорциональна  $\sqrt{\beta}$ , т. е. обратно пропорциональна корню квадратному из частоты измерений.

При больших  $\beta$  (для безынерционного прибора) оптимальная интерполяция дает небольшой выигрыш. Например, при  $\beta \rightarrow \infty$  (и  $\alpha = 0$ ) для  $D_{\text{ср}}$  при линейной и оптимальной с нормировкой весов и без нее интерполяции получим: 1,67, 1,5 и 1.

Аналогично несложно получить выражения для  $\delta_{\text{ср}}^2$  при  $T_{\text{ф}} \rightarrow \infty$ . При  $\beta \ll 1$  для линейной интерполяции с коррекцией и оптимальной интерполяции  $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \delta_{\text{ср}}^2 \approx \frac{\beta}{3} \sigma_x^2$ , т. е. совпадает со значением  $\delta_{\text{ср}}^2$  при  $T_{\text{ф}} = 0$ . Очевидно, при больших  $T_{\text{ф}}$  выигрыш от использования коррекции или оптимальной обработки может быть очень значительным (при линейной интерполяции этот предел равен  $\sigma_x^2$ ) и тем больше, чем меньше  $\beta$ , т. е. чем больше частота и результирующая точность измерений.

При  $\beta = 0,1$  (рис. 3) для кривой 1  $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,1$ ,  $D_{\text{min}} = 0,0301$ ; для кривых 2, 5, 6 (зависимости  $D_{\text{ср}}(\alpha)$  для линейной интерполяции с коррекцией и оптимальной с нормировкой весов и без нее в данном случае практически совпадают)  $\alpha_{\text{опт}} \approx 0,35$ ,  $D_{\text{min}} = 0,0253 \div 0,0257$ ; при  $\alpha = 0$  для всех случаев  $D \approx 0,0333$ .

На рис. 3 для  $\beta = 0,1$  приведена также зависимость  $D_{\text{ср}}$  от  $\alpha$  при ступенчатой интерполяции (при  $b(t) = 1$ , кривая 7). Как видно из рис. 3, при больших  $\alpha$  ступенчатая интерполяция может обеспечивать большую точность, чем линейная, т. е. инерция прибора влияет на сравнительную оценку используемых методов восстановления.

Рассмотренные примеры показывают, что рациональный выбор способа осреднения (в нашем случае  $T_{\text{ф}}$ ) для многих задач позволяет заметно повысить точность (по сравнению с использованием мгновенных отсчетов) даже при  $y = y_1 = 0$ . Приведенные примеры иллюстрируют и другой общий вывод, что при обработке результатов необходимо учитывать способ их получения, т. е. весовую функцию  $h(t)$ . В последнем примере при  $\beta \ll 1$  такой учет позволил теоретически (без учета случайных погрешностей  $y$  и  $y_1$  и нестабильности  $T_{\text{ф}}$ ) получить точность, незначительно уступающую максимальной даже при бесконечно большой инерции прибора. Важно отметить, что во многих случаях для учета влияния осредняющего прибора можно использовать не оптимальную обработку (требующую знания  $R_x(t)$  и сравнительно сложных расчетов), а более простые и достаточно эффективные методы. Примером является использование предложенной простой коррекции.

Выше в ряде примеров тип входного фильтра был выбран заранее и определялись его оптимальные параметры ( $T_{\text{ф}}$ ). Как отмечалось, неправильный выбор типа фильтра, как и использование обработки, отличной от оптимальной, может привести к резкому увеличению погрешности  $\delta_{\text{ср}}^2$  по сравнению с минимально возможной.

Поскольку нахождение оптимальной функции  $h(t)$  либо ее аппроксимация могут вызывать затруднение, для случаев, когда неясно, какой необходимо использовать тип фильтра, удобно оптимизировать параметры простых фильтров, существенно меняющих свой характер в зависимости от выбора параметров (например, типа интегро-дифференцирующего фильтра).

Наконец, поскольку корреляционные функции метеорологических процессов, как правило, известны с небольшой точностью, представляет интерес также исследовать влияние на результат отклонения  $R_x(t)$  или ее параметров от расчетных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Гидрометеоздат, Л., 1963.
2. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Об экономическом подходе к планированию сети метеорологических станций. Труды ГГО, вып. 208, 1967.
3. Каган Р. Л. О точности определения средней по площади по данным точечных измерений. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
4. Каган Р. Л. К оценке репрезентативности осадкомерных данных. Труды ГГО, вып. 191, 1966.
5. Персин С. М. Некоторые вопросы синтеза аналого-дискретных фильтров и репрезентативность метеорологических измерений. Труды Всесоюзного симпозиума по применению статистических методов в метеорологии. Гидрометеоздат, Л., 1971.
6. Персин С. М. О погрешности методов нахождения средних с помощью аналого-дискретного фильтра. Труды ГГО, вып. 259, 1970.
7. Персин С. М., Щепановская Л. А. Об учете нестабильности параметров инерционного прибора и погрешностей измерений при нахождении средних по ряду отсчетов. Труды ГГО, вып. 259, 1970.
8. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Физматгиз, 1960.
9. Юдин М. И. Некоторые вопросы теории метеорологических полей. Труды ГГО, вып. 19 (81), 1950.
10. Чанг Ш. С. Синтез оптимальных систем автоматического управления. «Машиностроение», 1964.
11. Brown, W. M. Optimum prefiltering of sampled data. IRE Trans. on IT 11—7, No. 4, 1961.
12. Petersen D. P. Middleton D. On representative observations. Tellus, vol. 15, No. 4, 1963.

## ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ КВАНТОВАНИЯ ПО УРОВНЮ

Под оптимальной шкалой устройства квантования по уровню понимается такая шкала, при которой при заданном числе квантов определенная характеристика, принятая в качестве критерия, достигает экстремального значения. Очевидно, выбор шкалы зависит от статистических характеристик измеряемого сигнала и опти-

мальность шкалы может пониматься лишь по отношению к определенному сигналу (или классу сигналов).

Рассмотрим квантование с фиксированной начальной фазой, т. е. с неизменным положением шкалы. В этом случае получаемое при квантовании дискретное значение  $z_i$  однозначно определяется значением измеряемой величины  $x$  или в общем случае значением суммы  $z'$  измеряемой величины  $x$  и случайной погрешности (помехи)  $y$ . Подобное квантование можно рассматривать как нелинейное преобразование непрерывной величины  $z'$  (рис. 1). Харак-

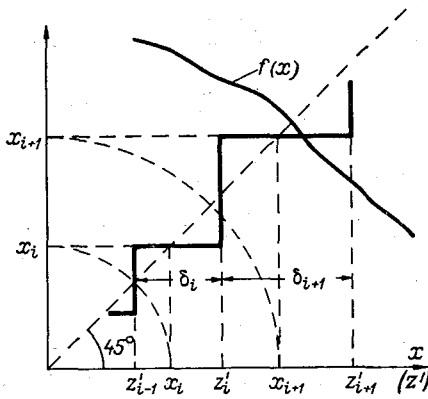


Рис. 1.

теристика квантующего устройства задается границами квантов  $z'_i$  и числовыми значениями  $x_i$ , приписываемыми дискретным состояниям  $z_i$  (соответствующим  $z'_{i-1} \leq z' < z'_i$ ).

В качестве критериев будем рассматривать величину средней квадратической погрешности измерений и количество измерительной информации. Очевидно, шкалы квантования, оптимальные с точки зрения рассматриваемых критериев, различаются между собой. Более того, сама постановка задачи в этих случаях является различной. В первом случае задача сводится как к оптимальному разбиению шкалы на кванты (нахождению  $z'_i$ ), так и к оптимальному выбору значений  $x_i$ , принимаемых за выходные уровни квантующего устройства. При использовании информационного критерия имеет значение лишь вероятность попадания квантуемой величины в определенные кванты, т. е. значения  $z'_i$ .

## Оптимальное квантование при использовании среднего квадратического критерия

Задача нахождения оптимальной с точки зрения среднего квадратического критерия шкалы квантования исследовалась в ряде работ [1—5, 8, 9]. Ниже рассматривается простой метод нахождения шкалы квантования, близкой к оптимальной, при большом числе квантов и с учетом случайной погрешности.

Дисперсия погрешности измерений (с учетом случайной погрешности и квантования по уровню) может быть представлена в виде

$$\sigma^2 = \int_L \sum_{i=1}^N \int_{z'_{i-1}}^{z'_i} (x - x_i)^2 \cdot \varphi(z' - x|x) \cdot f(x) dz' dx, \quad (1)$$

где  $f(x)$  и  $\varphi(y/x)$  — плотность распределения измеряемой величины и условная плотность распределения погрешности (в общем случае погрешность зависит от измеряемой величины),  $N$  — число квантов,  $L$  — диапазон изменения  $z'$ .

В (1) принято, что требования к абсолютной погрешности во всех точках шкалы одинаковы. Совершенно аналогично может быть рассмотрен случай, когда эти требования различны. Для этого достаточно заменить в (1)  $f(x)$  на произведение  $f(x) \cdot f_B^2(x)$ , где  $f_B(x)$  — заданная весовая функция, характеризующая требования к точности по шкале. Например, если минимизируется дисперсия не абсолютной, а относительной погрешности  $f_B(x) = \frac{1}{x}$ .

Продифференцировав (1) по  $x_i$  и  $z'_i$  и приравняв производные нулю, для оптимальной шкалы квантования получим

$$x_i = \frac{\int_{z'_{i-1}}^{z'_i} \psi(z') dz'}{\int_{z'_{i-1}}^{z'_i} \omega(z') dz'}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

$$2\psi(z'_i) = (x_i + x_{i+1}) \cdot \omega(z'_i), \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

где

$$\omega(z') = \int_L \varphi(z' - x|x) \cdot f(x) dx,$$

$$\psi(z') = \int_L x \varphi(z' - x|x) \cdot f(x) dx.$$

Из (2) и (3) несложно получить выражения для случая, когда погрешность  $y$  равна нулю [8].

Расчет оптимальной шкалы по выражениям (2) и (3) или соответствующим выражениям при отсутствии помехи  $y$  и расчет дисперсии погрешности при оптимальном квантовании крайне трудоемко, даже при небольшом числе квантов. Найдем приближенное аналитическое выражение для оптимального закона квантования при сравнительно большом числе квантов (этот случай представляет наибольший интерес для измерительных систем, в частности цифровых) и погрешности  $y$ , не равной нулю. Подставив из (2) значения  $x_i$  и  $x_{i+1}$  в (3) и воспользовавшись при большом  $N$  разложением функций  $\omega(z')$  и  $\psi(z')$  в ряд, приближенно получим

$$\delta_{i+1} - \delta_i \approx - \left[ \frac{1}{3} \frac{\omega'(z'_i)}{\omega(z'_i)} + \frac{2}{3} \frac{\varphi_1''(z'_i)}{\varphi_1'(z'_i)} \right] \delta_i^2, \quad (4)$$

где  $\delta_i = z'_i - z'_{i-1}$  — величина  $i$ -того кванта,  $\varphi_1(z') = \frac{\psi(z')}{\omega(z')}$ .

Введем переменную  $\eta$  и будем искать такую функцию  $z' = f_1(\eta)$ , чтобы при оптимальном разбиении шкалы  $z'(x_0, x_0 + L)$  шкала квантования переменной  $\eta(0, 1)$  была равномерной (с квантом  $\Delta_1 = \frac{1}{N}$ ). Полагая в (4)  $\Delta_1 \rightarrow 0$  и интегрируя полученное дифференциальное уравнение, находим

$$\ln \left( \frac{dz'}{d\eta} \right) = - \frac{1}{3} \ln \omega(z') - \frac{2}{3} \ln \varphi_1'(z') + C_1,$$

откуда

$$\eta = C \int_{x_0}^{z'} \sqrt[3]{\omega(z') \cdot [\varphi_1'(z')]^2} dz' + \eta_0.$$

Значения  $C$  и  $\eta_0$  определяем из граничных условий. Окончательно получим

$$\eta = \frac{\int_{x_0}^{z'} \sqrt[3]{\psi_1(z')} dz'}{\int_{x_0}^{x_0+L} \sqrt[3]{\psi_1(z')} dz'} = \bar{f}_1(z'), \quad (5)$$

где

$$\psi_1(z') = \omega(z') \left[ \frac{d\varphi_1(z')}{dz'} \right]^2.$$

Выражение (5) определяет оптимальный закон квантования при достаточно большом  $N$  и произвольном распределении  $x$  и погрешности  $y$ .

При отсутствии случайной погрешности  $y$   $\psi_1(z') = f(z')$ , что совпадает с результатами, полученными в [4, 5, 9]. Для этого слу-

чая дисперсия погрешности дискретности при оптимальном квантовании

$$\sigma_0^2 \approx \sum_{i=1}^N f(z_i'') \frac{\delta_i^3}{12} \approx \frac{\left[ \int_{x_0}^{x_0+L} \sqrt[3]{f(x)} dx \right]^3}{12N^2}, \quad (6)$$

где  $z_i'' = \frac{z_i' + z_{i-1}'}{2}$ . В (5) и (6) область  $L$  может быть бесконечной (полагаем, что дисперсии измеряемой величины  $\sigma_x^2 = \int_L f(x) x^2 dx$  и погрешности  $\sigma_y^2$  конечны).

Отношение дисперсии погрешности дискретности при оптимальном квантовании к дисперсии при равномерном квантовании может быть представлено в виде (при  $\sigma_y^2 = 0$ , конечном  $L$  и достаточно большом  $N$ )

$$\frac{\sigma_0^2}{\sigma_p^2} \approx \frac{\left[ \int_{x_0}^{x_0+L} \sqrt[3]{f(x)} dx \right]^3}{L^2}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет заранее (до разбиения шкалы) оценить эффективность оптимального квантования по сравнению с равномерным при том же  $N$  (при  $\sigma_y^2 = 0$ ). При достаточно большом  $N$  эта величина, как и оптимальный закон квантования  $x = f_1(\eta)$ , приближенно не зависит от числа квантов, а погрешность дискретности при оптимальном квантовании обратно пропорциональна  $N$ .

При цифровых измерениях часто представляет интерес непосредственно зависимость  $\eta = \bar{f}_1(z')$  (например, это характеристика функционального преобразователя, включенного на входе цифрового измерительного устройства с равномерной шкалой квантования). Значения  $z_i'$  могут быть определены графически (рис. 2) или из выражения

$$\frac{i}{N} = \bar{f}_1(z_i'), \quad (5')$$

а значения  $x_i$ , например, при  $\sigma_y^2 = 0$  по приближенному выражению

$$x_i \approx z_i'' - \frac{\delta_i^2}{12} \frac{f'(z_i'')}{f(z_i'')}.$$

В большинстве случаев с достаточной точностью можно полагать значения  $x_i$  равными  $f_1\left(\frac{2i-1}{2N}\right)$  или даже  $z_i''$ .

Рассмотрим некоторые примеры. Пусть  $\sigma_y^2 = 0$  и

$$f(x) = \frac{1}{2T \left(1 - e^{-\frac{L}{2T}}\right)} e^{-\frac{|x|}{T}}, \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}. \quad (8)$$

В этом случае

$$\frac{\sigma_0^2}{\sigma_p^2} = 3 \left( \frac{6T}{L} \right)^2 \frac{\left( 1 - e^{-\frac{L}{6T}} \right)^3}{1 - e^{-\frac{L}{2T}}}.$$

Очевидно,  $\frac{\sigma_0}{\sigma_p}$  всегда меньше единицы и тем меньше, чем больше  $\frac{L}{T}$ , т. е. чем больше изменение плотности вероятности  $f(x)$  в области  $L$ . В частности, при  $\frac{L}{T} \rightarrow 0$   $\frac{\sigma_0}{\sigma_p} \rightarrow 1$ ; при  $L = 9,23T$ , что соответствует уменьшению плотности вероятности при  $|x| = \frac{L}{2}$  по сравнению с максимальной (при  $x=0$ ) в 100 раз,  $\frac{\sigma_0^2}{\sigma_p^2} = 0,62$ ;

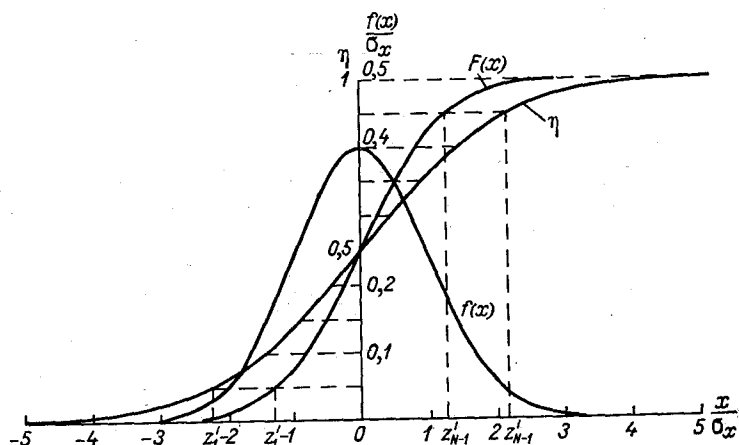


Рис. 2.

при  $L = 24T$   $\frac{\sigma_0^2}{\sigma_p^2} = 0,177$ . Таким образом, неравномерное квантование приводит к существенному уменьшению погрешности дискретности лишь при резкой неравномерности распределения измеряемой величины в области  $L$ . При  $L \rightarrow \infty$   $\sigma_0^2 \approx 9 \frac{T^2}{N^2}$ , т. е. средняя квадратическая погрешность при достаточно большом числе квантов приближенно равна  $3 \frac{T}{N}$ .

$$\text{Пусть } f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty.$$

При  $\sigma_y^2 = 0$  значения границ квантов  $z'_i$  находим из выражения

$$\frac{i}{N} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi \left( \frac{z'_i}{\sqrt{3}\sigma_x} \right), \quad i = 0, 1, \dots, N. \quad (8')$$

При достаточно большом числе квантов дисперсия  $\sigma_0^2 \approx \frac{\sqrt{3}\pi}{2} \left( \frac{\sigma_x}{N} \right)^2$ , т. е. средняя квадратическая погрешность дискретности при оптимальном квантовании нормально распределенной в диапазоне  $(-\infty, \infty)$  величины приближенно равна  $1,65 \frac{\sigma_x}{N}$ .

Примем в последнем примере, что помеха  $y$  не равна нулю, а распределена по нормальному закону с дисперсией  $\sigma_y^2$  и не зависит от  $x$ . Для этого случая из выражения (5) получим

$$\psi_1(z') = \frac{\sigma_x^4}{\sqrt{2\pi}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{2,5}} e^{-\frac{(z')^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}}.$$

Для рассматриваемого примера оптимальная шкала квантования также определяется выражением (8'), но с заменой в последнем  $\sigma_x$  на  $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ .

Сопоставим оптимальные шкалы квантования для нормального закона распределения  $f(x)$ , полученные в [8] с помощью цифровой вычислительной машины (при  $\sigma_y^2 = 0$  и для числа квантов  $N$  от 1 до 36) и по приведенным приближенным выражениям. Для большей наглядности возьмем число квантов достаточно малым. Приведем значения  $\frac{z'_i}{\sigma_x}$  (при  $z'_i \geq 0$ ), полученные этими двумя методами (I и II соответственно), при числе квантов  $N = 20$ ;

|     |   |        |        |        |        |       |       |       |       |       |          |
|-----|---|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| $i$ | 0 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10       |
| I   | 0 | 0,2083 | 0,4197 | 0,6375 | 0,8661 | 1,111 | 1,381 | 1,690 | 2,068 | 2,594 | $\infty$ |
| II  | 0 | 0,218  | 0,438  | 0,667  | 0,907  | 1,168 | 1,458 | 1,795 | 2,22  | 2,85  | $\infty$ |

Как видно, приближенный метод нахождения оптимальной шкалы квантования обеспечивает сравнительно высокую точность даже при малом числе квантов. Значения дисперсии погрешности, взятые из работы [8] и определенные по выражению (6), равны соответственно  $0,006203\sigma_x^2$  и  $0,0068\sigma_x^2$ . При увеличении числа квантов точность рассматриваемого метода возрастает. Так, при  $N = 36$  указанные значения дисперсии равны  $0,001985\sigma_x^2$  и  $0,00208\sigma_x^2$ , т. е. отличаются на 5%.

С помощью ЦВМ была также рассчитана дисперсия погрешности при значениях  $z'_i$ , приведенных в строке II таблицы. При этом

значения  $x_i$  (по  $z'_i$ ) в одном случае определялись по выражению (2), а в другом — принимались равными  $z''_i$  (за исключением  $x_{10}$ , определяемого как  $2z'_9 - x_9$ ). Полученные значения дисперсии составили соответственно  $0,00638 \sigma_x^2$  и  $0,00679 \sigma_x^2$ . Очевидно, все приведенные значения достаточно близки.

В заключение необходимо отметить, что для распространенного случая, когда величина погрешности  $y$  много меньше среднего квадратического значения измеряемой величины, за оптимальный с достаточной точностью может быть принят соответствующий закон квантования при отсутствии погрешности. В этом несложно убедиться, рассмотрев выражение (5). Разлагая в выражении для  $\psi(z')$   $f(z' - y)$  в ряд по  $y$ , с учетом принятого допущения получим, что

$$\psi_1(z') \approx \omega(z') \cdot \left\{ 1 + \sigma_y^2 \frac{d}{dz'} \left[ \frac{f'(z')}{\omega(z')} \right] \right\}^2$$

и при  $\sigma_y \ll \sigma_x$  близко к  $f(x)$ . Следует отметить, что при увеличении погрешности  $y$  эффективность оптимального квантования (т. е. степень уменьшения дисперсии погрешности по сравнению с равномерным квантованием) падает.

### Оптимальное квантование при использовании информационного критерия

Как указывалось выше, при использовании информационного критерия имеет значение разбиение диапазона изменения изменяемой величины на кванты, а не уровни  $x_i$ , приписываемые квантованным значениям. Найдем общее выражение для оптимального с точки зрения информационного критерия квантования при погрешности  $y$ , не равной нулю.

Количество информации, получаемое при неравномерном квантовании, может быть найдено из выражения

$$I_{z, x} = - \sum_{i=1}^N P(z_i) \log P(z_i) + \int_L f(x) \cdot \sum_{i=1}^N P(z_i/x) \times \\ \times \log P(z_i/x) dx, \quad (9)$$

где

$$P(z_i) = \int_{z'_{i-1}}^{z'_i} \omega(z') dz' \text{ и } P(z_i/x) = \int_{z'_{i-1}}^{z'_i} \omega_1(z'/x) dz'$$

— вероятность и условная вероятность  $i$ -того результата квантования ( $z_i$ ),  $\omega_1(z'/x) = \varphi(z' - x/x)$  — условная плотность вероятности суммы  $z' = x + y$  при значении измеряемой величины, равном  $x$ .

Для нахождения оптимальных значений  $z'_i$  продифференцируем выражение (9) по  $z'_i$  и приравняем производные нулю. В результате получим следующую систему  $N - 1$  уравнений для определения  $N - 1$  неизвестных:

$$\log \frac{P(z_i)}{P(z_{i+1})} \cdot \omega(z'_i) = \int_L f(x) \cdot \log \frac{P(z_i/x)}{P(z_{i+1}/x)} \cdot \omega_1(z'_i/x) dx, \quad i = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (10)$$

Выражения (10) позволяют найти оптимальный закон квантования в общем случае (при произвольных распределении и соотношении дисперсий измеряемой величины и погрешности). Однако расчет по этим выражениям трудоемок и возможен лишь при использовании вычислительной машины. Задача упрощается, если рассматривать квантование при погрешности измерений, равной нулю. В этом случае полная условная энтропия дискретной системы  $H(Z/X)$  равна нулю и количество информации равно безусловной энтропии результатов квантования  $H(Z)$ .

Если помеха  $y$  равна нулю, то из выражений (10) несложно получить известный результат:

$$P(z_i) = P(z_{i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (11)$$

(энтропия дискретной системы достигает максимального значения при равной вероятности всех ее возможных состояний). При этом значения  $z'_i$  оптимальной шкалы могут быть найдены из выражения

$$\frac{i}{N} = \int_{-\infty}^{z'_i} f(x) dx = F(z'_i), \quad (12)$$

где  $F(x)$  — интегральный закон распределения измеряемой величины.

Графический метод нахождения  $z'_i$  для нормального распределения  $f(x)$  показан на рис. 2. На этом же рисунке для сравнения приведена зависимость  $\eta = \bar{f}_1(x)$  для оптимального закона квантования с точки зрения среднего квадратического критерия.

Выражения (12) и (5') сходны, однако при использовании среднего квадратического критерия под знаком интеграла стоит корень кубический из плотности вероятности  $f(x)$ , а при использовании информационного критерия — непосредственно  $f(x)$ . Аналогично при большом числе квантов величина  $i$ -того кванта в первом случае обратно пропорциональна примерно  $\sqrt[3]{f(z'_i)}$ , а во втором  $f(z'_i)$ . Таким образом, нелинейность оптимальной характеристики квантования и степень зависимости величины квантов от плотности

распределения измеряемой величины в первом случае много меньше, чем во втором.

При погрешности  $y$ , равной нулю, и достаточно большом числе квантов выигрыш  $\Delta I$  в количестве информации при оптимальном квантовании ( $I_0 = \log N$ ) по сравнению с равномерным приближенно равен

$$\Delta I \approx I_0 - I_p \approx \int_L f(x) \cdot \log [f(x) \cdot L] dx. \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим распределение (8). Из выражений (5') и (12) (при  $N$  четном и  $z'_i \geq 0$ ) и (13) имеем:

$$z'_i = -3T \ln \frac{1}{N} \left( N - 2i + 2ie^{-\frac{L}{6T}} \right),$$

$$z'_i = -T \ln \frac{1}{N} \left( N - 2i + 2ie^{-\frac{L}{2T}} \right), \quad i = 0, 1, \dots, \frac{N}{2},$$

$$\Delta I \approx \log \frac{2T}{L} \left( 1 - e^{-\frac{L}{2T}} \right) + \frac{1 - e^{-\frac{L}{2T}} \left( 1 + \frac{L}{2T} \right)}{1 - e^{-\frac{L}{2T}}} \log e.$$

При  $\frac{L}{T} \rightarrow 0$   $\Delta I \rightarrow 0$ , при  $L = 9,23T$   $\Delta I = 3,65$  двоичных единиц, при  $L = 24T$   $\Delta I \approx 5$  двоичных единиц. Таким образом, эффективность оптимального квантования при сравнительно малой неравномерности распределения  $f(x)$  и использовании информационного критерия значительно больше, чем при использовании среднего квадратического критерия. При существенной неравномерности распределения  $f(x)$  ( $L \gg T$ ) эффективность оптимального квантования в обоих случаях увеличивается практически пропорционально отношению  $\frac{L}{T} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_p} \approx \frac{6\sqrt{3}T}{L}$ ,  $\Delta I \approx \log \frac{Le}{2T}$ .

При погрешности  $y$ , не равной нулю, выигрыш в количестве информации, получаемый при оптимальном квантовании, также уменьшается с увеличением погрешности измерений.

Рассмотрим приближенный метод нахождения количества информации при неравномерном квантовании для случая, когда величины погрешности измерений и квантов много меньше среднего квадратического значения измеряемой величины. Пусть закон квантования известен, т. е. известна функция  $x = f_2(\eta)$ , причем  $x_0 = f_2(\eta_0)$  и  $x_0 + L = f_2(\eta_0 + L)$ . Квантование величины  $\eta$  является равномерным.

Очевидно, задача нахождения количества информации при неравномерном квантовании (величины  $x$ ) может быть сведена к нахождению количества информации при равномерном квантовании (величины  $\eta$ ).

Для величины  $\eta$  плотность распределения  $\varphi_1(\eta)$  может быть найдена, если известна плотность распределения измеряемой величины и функция  $f_2(\eta)$ :  $\varphi_1(\eta) = \frac{f(x)}{\bar{f}_2(x)}$ .

При принятом выше допущении и плавном характере функции  $f_2(\eta)$  приближенно можно считать, что при функциональном преобразовании  $\eta = \bar{f}_2(x)$  меняется лишь условная дисперсия погрешности измерений, а закон распределения остается неизменным.

Среднее квадратическое значение погрешности  $\sigma_y(\eta) \approx \sigma_y(x) \bar{f}_2'(x)$ . Зная  $\varphi_1(\eta)$ ,  $\sigma_y(\eta)$  и число  $N = \frac{L}{\Delta}$ , несложно найти количество информации по выражениям для равномерного квантования [6, 7]. Для безусловной энтропии можно записать

$$H(Z) \approx - \int_L \varphi_1(\eta) \cdot \log \varphi_1(\eta) d\eta - \log \Delta = - \int_L f(x) \log f(x) dx - \log \Delta + \int_L f(x) \cdot \log \bar{f}_2'(x) dx. \quad (14)$$

Аналогично

$$H(Z/X) \approx \int_L \varphi_1(\eta) \cdot H(Z/\eta) d\eta = \int_L f(x) \cdot H(Z/\eta) dx, \quad (15)$$

где  $H(Z/\eta)$  — полная условная энтропия при равномерном квантовании и аддитивной погрешности с дисперсией  $\sigma_y^2(\eta)$ .

Для примера рассмотрим распространенный случай квантования с величиной кванта, линейно зависящей от измеряемой величины [7]. В этом случае

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{\Delta}{k + lx}; \quad \eta = \frac{\Delta}{l} \ln(k + lx) = \bar{f}_2(x), \quad \text{где } 0 \leq x \leq L.$$

Принимая во внимание, что  $\Delta = \frac{L}{N}$  и  $\bar{f}_2(x_0 + L) - \bar{f}_2(x_0) = L$ , получим

$$N = \frac{\ln\left(1 + \frac{lL}{k}\right)}{l}.$$

Из выражения (14) найдем энтропию  $H(Z)$ . Например, при равномерном распределении величины  $x$

$$H(Z) = \log N - \frac{1}{L} \int_0^L \log \frac{k + lx}{\Delta} dx = \log \frac{Le}{k + lL} - \frac{k}{lL} \log \frac{k + lL}{k}.$$

Пусть в рассматриваемом примере погрешность измерений имеет равномерное распределение с плотностью  $\frac{1}{a(x)}$ . Тогда

с учетом выражений, приведенных в работе [7], и формулы (15) можно записать

$$H(Z/X) \approx \int_{L_1} f(x) \left[ \log \frac{a(x) \cdot \bar{f}_2'(x)}{\Delta} + \frac{\Delta}{2 \ln 2 \cdot a(x) \cdot \bar{f}_2'(x)} \right] dx + \\ + \int_{L_2} f(x) \frac{a(x) \cdot \bar{f}_2'(x)}{2 \ln 2 \cdot \Delta} dx,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — части области  $L$ , в которых эквивалентная величина погрешности  $a(x) \cdot \bar{f}_2'(x)$  соответственно больше и равна или меньше  $\Delta$ .

Количество информации находится как разность энтропий  $H(Z)$  и  $H(Z/X)$ .

Полученное выражение может быть использовано и для нахождения функции  $\eta = \bar{f}_2(x)$ , близкой к оптимальной (например, задавшись видом функции — ее оптимальных параметров).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Величкин А. И. Оптимальные характеристики квантующих устройств. Радиотехника, № 6, 1961.
2. Величкин А. И. Средняя квадратическая ошибка при квантовании непрерывных сообщений с шумом. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, № 4, 1964.
3. Гармаш В. А. Квантование сигналов с неравномерным шагом. Электро-связь, № 10, 1957.
4. Гришанин Б. А. Об асимптотическом решении задачи оптимального квантования случайного сигнала. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, № 1, 1968.
5. Персин С. М. К вопросу об эффективности нелинейных шкал. Тезисы докладов IV конф. «Кибернетические пути совершенствования методов измерений и контроля», Л., 1964.
6. Персин С. М. Количество информации при цифровом измерении. Измерительная техника, № 7, 1964.
7. Персин С. М. Информационные характеристики цифровых измерительных систем. Сб. «Автоматический контроль и методы электрических измерений». Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР. Новосибирск, 1965.
8. Max I. Quantizing for minimum distortion. Trans. IRE on IT, III—6, No. 1, 1960.
9. Ros Glienn. Quantizing for minimum distortion. IEEE Trans. on IT, vol. 10, No. 4, 1964.

## МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕЙ СРЕДНИХ МЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Информация о состоянии и изменениях гидрометеорологического режима широко используется как для исследовательских, так и для практических целей. При этом потребители чаще интересуются данными о гидрометеорологическом режиме не в самой точке наблюдений, а в некотором удалении от пункта наблюдения. В этой связи вопросы пространственной интерпретации сетевых наблюдений в виде полей элементов приобретают особую значимость.

Однако все существующие в настоящее время методы исследования пространственной изменчивости метеорологических элементов, удовлетворительно описывая характер случайных отклонений поля в точках измерения от некоторых средних или от значений поля элемента в этих точках, не позволяют выявить закономерности изменения по территории для рассматриваемой конкретной ситуации. Вместе с тем ряд важнейших научно-методических проблем обработки информации о гидрометеорологическом режиме остается нерешенным. В первую очередь это относится к разработке методов расчета пространственной структуры полей метеорологических элементов с учетом местных условий, особенно сильно сказывающихся на всех сферах деятельности человека.

Более или менее удовлетворительно методы исследования закономерных изменений метеорологических элементов в пространстве разработаны как ручные методы контроля материалов наблюдений для пересеченной местности [1]. Однако и здесь преобладают рассуждения качественного характера.

Между тем развитие вычислительной техники и математического аппарата создает реальную основу для количественного подхода к решению задачи расчета пространственной структуры полей.

Известно, что поля метеорологических элементов у земли можно описать многочленами  $n$ -й степени. Как показывают исследования, при описании полей средних месячных значений элементов достаточно ограничиться многочленами первой и второй степени, так как изменчивость таких полей сравнительно невелика. Последнее справедливо, если аппроксимация производится для полей небольших размеров (вопрос об оптимальных размерах поля при аппроксимации еще требует своего разрешения). Учитывая, что по Генеральной схеме комплексной автоматизации Гидрометслужбы

СССР центрами сбора первичной информации [2] являются зональные гидрометеорологические обсерватории (ЗГМО), в дальнейшем речь пойдет о полях основных метеорологических элементов для территорий ЗГМО.

В соответствии с общей теорией поля средних месячных значений основных метеорологических элементов можно характеризовать:

1) средним значением элемента, которое рассматривается как интегральная характеристика для площади  $S$ :

$$U_{cp} = \frac{1}{S} \iint F(x, y) dS; \quad (1)$$

2) средней скоростью изменения рассматриваемого элемента по некоторому направлению — как производная, вычисляемая в направлении, вдоль которого изучается изменение функции  $U = F(x, y)$ :

$$\Delta_x U = \frac{dU}{dx}; \quad \Delta_y U = \frac{dU}{dy}; \quad (2)$$

3) градиентом, который представляет собой вектор, направленный в сторону быстреего возрастания функции  $U(x, y)$  и равный скорости изменения функции в этом направлении:

$$\text{grad } U = \frac{dU}{dx} i + \frac{dU}{dy} j. \quad (3)$$

Модуль градиента запишется в виде

$$|\text{grad } U| = \sqrt{\left(\frac{dU}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dU}{dy}\right)^2}. \quad (4)$$

В исследованиях, посвященных проблеме получения средних по площади характеристик, изучаемая территория  $S$  обычно разбивается на элементарные площади  $s_i$  так, чтобы сумма элементарных площадок  $s_i$  по возможности более точно равнялась полной площади  $S$ , т. е. чтобы

$$\sum_{i=1}^n s_i = S.$$

При этом значение  $f(0)$ , наблюдаемое в центре элементарной площадки, принимается за оценку среднего, относящуюся к этой площади, а соответствующее реальное среднее значение для всей рассматриваемой территории выражается формулой

$$U_{cp} = \frac{1}{s_i} \int_{s_i} f(S) dS, \quad (5)$$

где  $dS$  указывает на интегрирование по элементам территории (см., например, [3]).

Такие оценки, как известно, не являются вполне точными. Неточность оценки тем больше, чем менее равномерно размещены

станции за счет того, что некоторые части территории остаются вне элементарных площадок или перекрываются последними.

Другая причина неточности оценки средних (о которой часто забывают упомянуть при получении средних по площади с использованием автокорреляционных и структурных функций), — отсутствие достаточно надежных данных о статистической структуре полей исследуемых элементов.

Для небольших территорий с ограниченным числом станций, какими являются территории ЗГМО, получение автокорреляционных функций и тем более корреляционных матриц осложняется еще и тем, что ряды наблюдений на части станций оказываются либо короткими, либо неоднородными. Кроме того, получить корреляционные связи для конкретного случая (реализации), как правило, не представляется возможным. Оценка же среднего по корреляционным связям, вычисленным за ряд лет, может оказаться отличной от реального среднего из-за того, что в данной конкретной ситуации для данного месяца корреляционные связи могли быть совсем другими.

В связи с этим для получения характеристик полей средних месячных значений более реальной представляется попытка использовать аппроксимацию полей многочленами. Очевидно, что средние оценки при таком определении окажутся тем точнее, чем лучше аппроксимирующий полином отражает характер действительного распределения изучаемого элемента по территории.

Нахождение же оптимальных размеров и формы элементарных площадок несколько проще. Заранее очевидно, что бессмысленно пытаться представлять одним полиномом распределение элемента на всей рассматриваемой территории. Однако элементарная площадка  $s_i$  в случае аппроксимации распределения элемента многочленом первой степени не должна быть меньше территории, занятой четырьмя станциями. Целесообразно, по-видимому, привлекать для аппроксимации значения в шести-семи точках, так как это дает возможность отбрасывать при аппроксимации те или иные точки в целях наилучшего проведения аппроксимирующей плоскости.

Для простоты рассуждений будем вычислять характеристики поля для окрестности станции в предположении равномерного распределения станций.

С этой целью разделим всю территорию на многоугольники так, чтобы вершины их находились на соседних станциях, которые привлекаются для аппроксимации. Заменим полученные таким

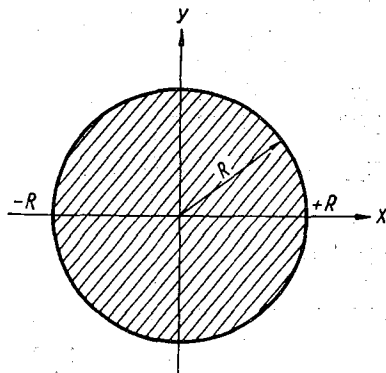


Рис. 1. Схема элементарной площадки  $s_i$ .

образом многоугольники кругами площадью  $s_i$ , как это сделано в [3]. Тогда значение  $U_{\text{ср}}$ , полученное по формуле (1), можно считать оценкой среднего значения, относящейся к этой элементарной площади  $s_i$ .

Вычислим характеристики поля в окрестности станций в предположении, что распределение метеорологического элемента аппроксимируется многочленом первой степени вида

$$U = Ax + By + C. \quad (6)$$

Здесь  $A$ ,  $B$  и  $C$  единственным образом определяются из условия минимума суммы квадратов отклонений формы (6) в точках с декартовыми координатами  $(x_i, y_i)$  от измеренных значений элемента в тех же точках, по которым определялась форма (6).

Поместим начало координат в центр окружности, т. е. на станцию, для окрестности которой разыскиваются характеристики поля (рис. 1). Тогда в соответствии с принятым выше условием радиус окружности  $R = \frac{1}{2} \rho$ , где  $\rho$  — расстояние между станциями. Оче-

видно также, что  $S = \pi R^2$ ,  $x^2 + y^2 \leq R^2$ , а  $y = \pm \sqrt{R^2 - x^2}$  (уравнение области).

Искомое значение среднего для заштрихованной области будем искать по формуле вида:

$$\begin{aligned} U_{\text{ср}} &= \frac{1}{s} \iint_{(s)} (Ax + By + C) dx dy = \\ &= \frac{1}{s} \int_{-R}^{+R} \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{+\sqrt{R^2-x^2}} (Ax + By + C) dx dy = \\ &= \frac{1}{s} \int_{-R}^{+R} \left( Axy + \frac{By^2}{2} + Cy \right) \Big|_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{+\sqrt{R^2-x^2}} dx = \\ &= \frac{1}{s} \int_{-R}^{+R} (2Ax \sqrt{R^2-x^2} + 2C \sqrt{R^2-x^2}) dx = \\ &= \frac{1}{s} \left[ 2A \int_{-R}^{+R} x \sqrt{R^2-x^2} dx + 2C \int_{-R}^{+R} \sqrt{R^2-x^2} dx \right] = \\ &= \frac{1}{s} \left[ 2A \left( -\frac{1}{3} \right) \sqrt{(R^2-x^2)^3} \Big|_{-R}^{+R} + 2C \cdot \frac{1}{2} \left( x \sqrt{R^2-x^2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + R^2 \arcsin \frac{x}{R} \right) \Big|_{-R}^{+R} \right] = \frac{C}{s} [R^2 \arcsin 1 + \arcsin 1 \cdot R^2] = \\ &= \frac{C}{s} \cdot R^2 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{\pi R^2}{s} \cdot C = C. \end{aligned}$$

Таким образом, для линейной аппроксимации поля в окрестности станции в случае равномерной сети среднее значение элемента равно значению аппроксимирующего многочлена в центре

$$U_{\text{ср}} = C. \quad (7)$$

Горизонтальные проекции вектора на оси  $x$ ,  $y$  и градиент легко определяются по формулам:

$$\Delta_x U = \frac{dU}{dx} = A, \quad (8)$$

$$\Delta_y U = \frac{dU}{dy} = B, \quad (9)$$

$$\text{grad } U = \frac{dU}{dx} i + \frac{dU}{dy} j; \quad (10)$$

модуль последнего запишется в виде

$$|\text{grad } U| = \sqrt{\left(\frac{dU}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dU}{dy}\right)^2} = \sqrt{A^2 + B^2}. \quad (11)$$

Аппроксимирующую плоскость можно принять за приближенный вид поля в окрестности станции. Следует, однако, иметь в виду, что с уменьшением окрестности станции это приближение также будет действительно, но все с меньшей точностью. Сведение понятия окрестности станции к точке лишено смысла и во всех случаях, когда нет достаточных оснований принимать для станции значение, отличающееся от измеренного. Такая замена значений целесообразна, по-видимому, только когда станция нерепрезентативна.

Представляет интерес построить карту распределения по территории Белорусского территориального гидрометцентра (БТГМЦ) средних значений и горизонтальных градиентов температуры и давления, полученных для окрестности каждой станции (рис. 2—5) с помощью специально составленной программы для ЭВМ «Минск-22».

Нет оснований полагать, что переход от окружностей, для которых выводилась формула (7), обратно к многоугольникам приведет к сколько-нибудь заметному искажению полученных средних оценок. Подтверждением сказанного могут служить данные табл. 1. Схема расположения станций для аппроксимации приводится на рис. 6.

Подсчет оценки среднего для всей территории в этом случае сведется к чисто арифметической операции над средними оценками, полученными для каждой из элементарных площадок.

При таком методе определения среднего значения для территории неравномерность размещения станций уже не играет столь важной роли, так как при аппроксимации мы учитываем значение элемента не только внутри элементарной площадки, но и на ее границах.



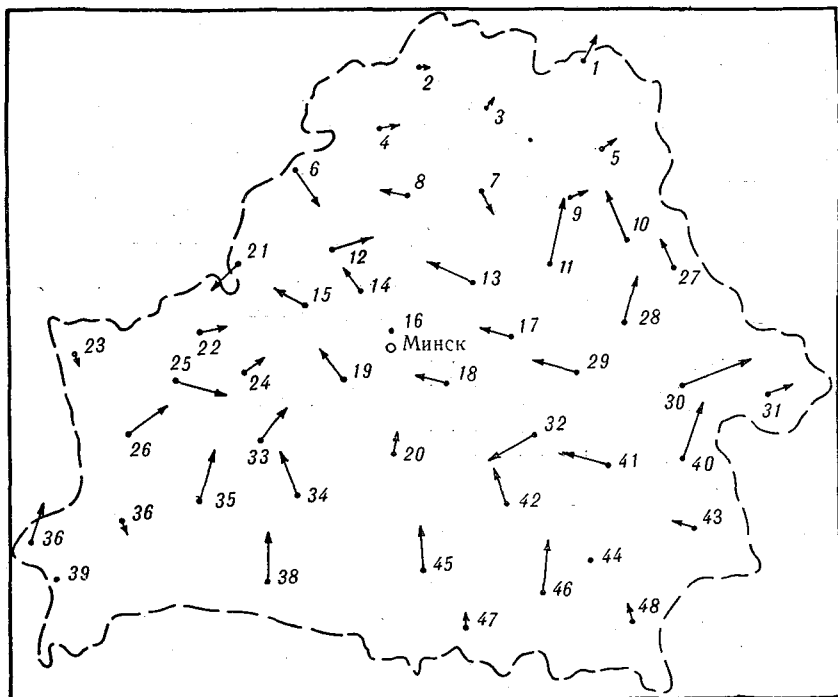


Рис. 4. Карта горизонтальных градиентов температуры воздуха в окрестности каждой станции. БТГМЦ, июнь 1970 г.

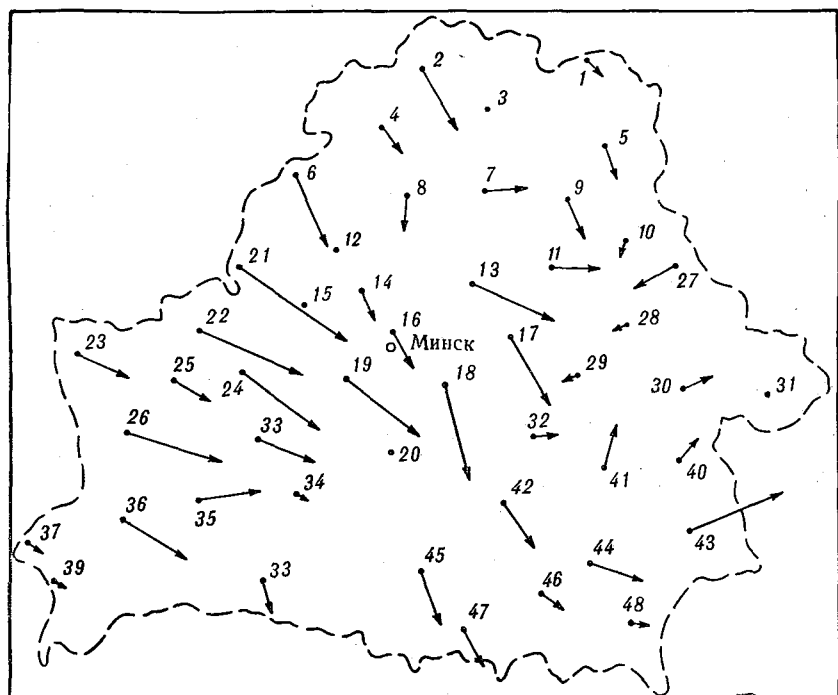


Рис. 5. Карта горизонтальных градиентов давления на уровне моря в окрестности каждой станции. БТГМЦ, июнь 1970 г.

Таблица 1

Средние значения поля в окрестности ст. Славное БТГМЦ, полученные при аппроксимации по станциям, лежащим на окружности (а) и в вершинах многоугольников (б и в)

| Элемент                        | Среднее значение |      |      |
|--------------------------------|------------------|------|------|
|                                | а                | б    | в    |
| Температура воздуха, °С . .    | 16,4             | 16,5 | 16,4 |
| Температура почвы, °С . . .    | 19,6             | 19,9 | 19,8 |
| Относительная влажность, %     | 71               | 70   | 69   |
| Скорость ветра, м/сек. . . . . | 2,2              | 2,3  | 2,3  |
| Давление, мб . . . . .         | 15,3             | 15,3 | 15,2 |

Предложенный метод позволяет в принципе вообще избавиться от появления перекрывающихся (или остающихся вне элементарных площадок) участков, однако может привести к увеличению

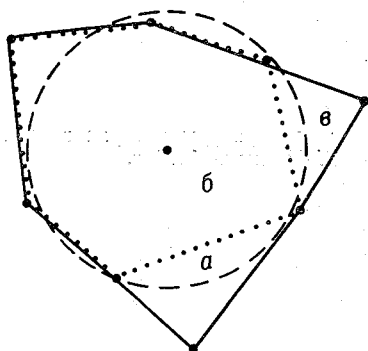


Рис. 6. Расположение станций при выборе элементарных площадок  $s_i$  в виде окружности (а) и многоугольников (б и в).

случайных погрешностей за счет уменьшения точности аппроксимации, если изменчивость элемента в пространстве велика.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по первичной обработке материалов метеорологических наблюдений. Гидрометеониздат, 1957.
2. Автоматизированная гидрометеорологическая система. Гидрометеониздат, Л., 1970.
3. Р. Целнаи. О точности средних по площади значений. Труды ГГО, вып. 267, 1970.

## ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НАД ВЛАЖНОСТЬЮ ВОЗДУХА НА СТАНЦИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ И В РАЙОНАХ С РЕДКОЙ СЕТЬЮ СТАНЦИЙ

В районах со сложными физико-географическими условиями распределение влажности воздуха характеризуется большой изменчивостью [1, 2, 5, 6].

Изменение характеристик влажности воздуха в сильной степени зависит от высоты над уровнем моря, форм рельефа, близости крупных водоемов, характера растительности. В связи с этим в районах с такими условиями трудно подобрать для анализа группы станций, имеющих сходные климатические условия, и, следовательно, применять метод линейной интерполяции [3, 4, 7] невозможно.

В настоящей работе рассматривается вопрос о возможности использования уравнений регрессии для контроля на ЭВМ данных влажности воздуха на станциях, расположенных в сложных физико-географических условиях.

В качестве исходного материала были использованы данные наблюдений над упругостью водяного пара, относительной влажностью воздуха, температурой воздуха и нижней облачностью на станциях, расположенных в горных районах Алтайского края и Урала (Западно-Сибирское и Омское УГМС), а также в районах Средней Азии (УГМС Казахской ССР) за период с 1958 по 1969 г. В результате анализа этих материалов было установлено, что в районах со сложными физико-географическими условиями можно подобрать отдельные пары станций, на которых наблюдается достаточно хорошая согласованность климатических условий. Такими оказались равнинные станции Саранпауль и Сосьва, Няксимволь и Игрим, горные — Кызыл-Озек и Чемал.

По данным наблюдений этих станций за указанный период были получены следующие уравнения регрессии:

1) для ст. Саранпауль

$$y = 1,19x - 12 \text{ для относительной влажности,}$$

$$y = x - 0,2 \text{ для упругости водяного пара,}$$

где  $y$  — значения влажности воздуха на ст. Саранпауль, а  $x$  — на ст. Сосьва;

2) для ст. Няксимволь

$$y = 1,04x + 1 \text{ для относительной влажности,}$$

$$y = 0,97x + 0,2 \text{ для упругости водяного пара,}$$

где  $y$  — значения влажности воздуха на ст. Няксимволь, а  $x$  — на ст. Игрим;

3) для ст. Кызыл-Озек

$$y = 1,04x - 0,1,$$

где  $y$  — значение упругости водяного пара на ст. Кызыл-Озек, а  $x$  — на ст. Чемал.

По этим уравнениям для указанных станций были вычислены значения упругости водяного пара и относительной влажности воздуха, а затем определены расхождения между фактическими и вычисленными значениями влажности. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Для определения надежности материалов наблюдений вычисленные расхождения сравнивались с допусками, принятыми для ручного контроля [1]. Данные наблюдений считались надежными, если соответствующие расхождения не превышали допусков.

Из табл. 1 видно, что на ст. Саранпауль выделяются значения относительной влажности и упругости водяного пара в 1959 и 1967 гг. При анализе установлено, что расхождения между фактическими и вычисленными значениями влажности воздуха, превышающие установленные допуски (3% по относительной влажности и 0,5 мб по упругости водяного пара для теплого периода) в 1959 г. обусловлены плохим качеством наблюдений на ст. Сосьва. Большие расхождения в 1967 г. на ст. Саранпауль и ст. Няксимволь по сравнению со станциями Сосьва и Игрим объясняются особенностями условий погоды на первых двух станциях в этом году.

Наблюдения на горных станциях Кызыл-Озек и Чемал сомнения не вызывают, так как разности вычисленных и фактических значений упругости водяного пара не превышают установленные допуски (0,3 мб для холодного периода).

Полученные результаты показывают, что на станциях со сходными климатическими условиями контроль на ЭВМ данных влажности можно производить с помощью уравнений регрессии, вычисленных для значений элемента на двух станциях.

Иногда подобрать пары станций с достаточно сходными климатическими условиями не удастся. Примером таких станций в рассматриваемых районах могут служить Кызыл-Орда (оазис) и Тургай (степь), в которых даже в холодное время года, когда особенности распределения влажности в этих районах выражены слабо, расхождения довольно велики (табл. 1). В таких случаях для проведения контроля можно использовать существующие связи между влажностью воздуха и другими метеорологическими элементами. Так, известно, что на многих станциях наблюдается тесная связь между средними месячными величинами упругости водяного пара и температуры воздуха, а также относительной влажности воздуха и нижней облачности.

На основании этих связей, по имеющимся данным наблюдений на горных станциях Кош-Агач, Полярный Урал и пустынных стан-

Таблица 1

Расхождения ( $\Delta$ ) между фактическими ( $\Phi$ ) и вычисленными ( $\Psi$ ) значениями относительной влажности воздуха и упругости водяного пара

| Год | Относительная влажность, % |        |          |            |        |          | Упругость водяного пара, мб |        |          |            |        |          |        |        |          |
|-----|----------------------------|--------|----------|------------|--------|----------|-----------------------------|--------|----------|------------|--------|----------|--------|--------|----------|
|     | $\Phi$                     | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$     | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$                      | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$     | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$ | $\Psi$ | $\Delta$ |
|     | Саранпауль                 |        |          | Няксимволь |        |          | Саранпауль                  |        |          | Няксимволь |        |          |        |        |          |

## Июль

|      |    |    |    |    |    |    |      |      |     |      |      |      |
|------|----|----|----|----|----|----|------|------|-----|------|------|------|
| 1958 | 64 | 63 | 1  | 70 | 71 | -1 | 10,2 | 10,0 | 0,2 | 11,3 | 11,7 | -0,4 |
| 1959 | 66 | 52 | 14 | 66 | 69 | -3 | 12,9 | 8,1  | 4,8 | 13,2 | 13,6 | -0,4 |
| 1960 | 60 | 61 | -1 | 65 | 65 | 0  | 10,8 | 10,3 | 0,5 | 11,3 | 10,8 | 0,5  |
| 1961 | 62 | 61 | 1  | 66 | 66 | 0  | 12,7 | 12,7 | 0,0 | 13,8 | 13,8 | 0,0  |
| 1962 | 72 | 72 | 0  | 74 | 75 | -1 | 14,7 | 14,7 | 0,0 | 15,6 | 15,1 | 0,5  |
| 1963 | 69 | 66 | 3  | 67 | 68 | -1 | 13,1 | 12,8 | 0,3 | 13,8 | 13,4 | 0,4  |
| 1964 | 66 | 64 | 2  | 67 | 68 | -1 | 13,1 | 12,8 | 0,3 | 13,6 | 13,9 | -0,3 |
| 1965 | 73 | 74 | -1 | 77 | 74 | 3  | 12,6 | 12,4 | 0,2 | 13,5 | 13,8 | -0,3 |
| 1966 | 71 | 69 | 2  | 71 | 70 | 1  | 13,6 | 13,4 | 0,2 | 14,0 | 13,8 | 0,2  |
| 1967 | 77 | 68 | 9  | 74 | 70 | 4  | 14,3 | 12,8 | 1,5 | 14,4 | 13,4 | 1,0  |

## Упругость водяного пара, мб

| Год | $\Phi$    | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$ | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$    | $\Psi$ | $\Delta$ | $\Phi$ | $\Psi$ | $\Delta$ |
|-----|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|
|     |           |        |          |        |        |          |           |        |          |        |        |          |
|     | Кзыл-Озек |        |          | Чемал  |        |          | Кзыл-Орда |        |          | Тургай |        |          |

## Январь

|      |     |     |     |     |     |      |     |     |      |     |     |      |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|
| 1961 | 2,0 | 2,0 | 0,0 | 2,0 | 2,0 | 0,0  | 2,9 | 3,2 | -0,3 | 2,0 | 1,8 | 0,2  |
| 1962 | 1,8 | 1,6 | 0,2 | 1,6 | 1,8 | -0,2 | 2,7 | 3,2 | -0,5 | 2,0 | 1,7 | 0,3  |
| 1963 | 2,0 | 2,0 | 0,0 | 2,0 | 2,0 | 0,0  | 4,0 | 3,5 | 0,5  | 2,2 | 2,5 | -0,3 |
| 1964 | 2,0 | 1,8 | 0,2 | 1,8 | 2,0 | -0,2 | 2,8 | 3,2 | -0,4 | 2,0 | 1,8 | 0,2  |
| 1965 | 2,0 | 2,0 | 0,0 | 2,0 | 2,0 | 0,0  | —   | —   | —    | —   | —   | —    |
| 1966 | 1,8 | 1,8 | 0,0 | 1,8 | 1,8 | 0,0  | 3,7 | 2,9 | 0,8  | 1,8 | 2,3 | -0,5 |
| 1967 | 1,3 | 1,1 | 0,2 | 1,2 | 1,3 | -0,1 | 2,1 | 2,6 | -0,5 | 1,6 | 1,3 | 0,3  |
| 1968 | 1,5 | 1,4 | 0,1 | 1,4 | 1,5 | -0,1 | 3,7 | 3,4 | 0,3  | 2,1 | 2,3 | -0,2 |
| 1969 | 0,7 | 0,5 | 0,2 | 0,6 | 0,8 | -0,2 | 1,0 | 0,7 | 0,3  | 0,4 | 0,6 | -0,2 |

циях Кзыл-Орда (оазис), Тургай (степь), Тюлькубас (степь), были получены следующие уравнения регрессии:

$$y = 22x - 41,4 \text{ для Кош-Агача,}$$

$$y = 5,1x - 23,7 \text{ для Кзыл-Орды,}$$

$$y = 4x - 22 \text{ для Тургая,}$$

Расхождения ( $\Delta$ ) между фактическими ( $\Phi$ ) и вычисленными ( $\Psi$ ) значениями упругости водяного пара, температуры воздуха, относительной влажности, нижней облачности

| Год  | Упругость водяного пара, мб |     |      |        |     |      |          |     |     | Температура воздуха, °С |       |      |        |       |      |          |       |      |
|------|-----------------------------|-----|------|--------|-----|------|----------|-----|-----|-------------------------|-------|------|--------|-------|------|----------|-------|------|
|      | Кзыл-Орда                   |     |      | Тургай |     |      | Кош-Агач |     |     | Кзыл-Орда               |       |      | Тургай |       |      | Кош-Агач |       |      |
|      |                             |     |      |        |     |      |          |     |     |                         |       |      |        |       |      |          |       |      |
|      | ф                           | в   | Δ    | ф      | в   | Δ    | ф        | в   | Δ   | ф                       | в     | Δ    | ф      | в     | Δ    | ф        | в     | Δ    |
| 1960 | —                           | —   | —    | —      | —   | —    | 0,6      | 0,6 | 0,0 | —                       | —     | —    | —      | —     | —    | —28,9    | —28,2 | —0,7 |
| 1961 | 2,9                         | 3,0 | —0,1 | 2,0    | 1,9 | 0,1  | 0,4      | 0,3 | 0,1 | —8,2                    | —8,9  | 0,7  | —14,2  | —14,0 | —0,2 | —34,6    | —32,6 | —2,0 |
| 1962 | 2,7                         | 2,9 | —0,2 | 2,0    | 2,0 | 0,0  | 0,5      | 0,5 | 0,0 | —9,0                    | —9,9  | 0,9  | —14,1  | —14,0 | —0,1 | —29,8    | —30,4 | 0,6  |
| 1963 | 4,0                         | 3,9 | 0,1  | 2,2    | 2,5 | —0,3 | 0,6      | 0,5 | 0,1 | —3,8                    | —3,3  | —0,5 | —11,9  | —13,2 | 1,3  | —29,0    | —28,2 | —0,8 |
| 1964 | 2,8                         | 3,0 | —0,2 | 2,0    | 2,1 | —0,1 | 0,5      | 0,5 | 0,0 | —8,6                    | —9,4  | 0,8  | —13,5  | —14,0 | 0,5  | —30,0    | —30,4 | 0,4  |
| 1965 | —                           | —   | —    | —      | —   | —    | 0,6      | 0,6 | 0,0 | —                       | —     | —    | —      | —     | —    | —27,6    | —28,2 | 0,6  |
| 1966 | 3,7                         | 3,8 | —0,1 | 1,8    | 1,6 | 0,2  | 0,7      | 0,7 | 0,0 | —4,3                    | —4,9  | 0,6  | —15,4  | —14,8 | —0,6 | —26,8    | —26,0 | —0,8 |
| 1967 | 2,1                         | 2,2 | —0,1 | 1,6    | 1,4 | 0,2  | 0,3      | 0,3 | 0,0 | —12,7                   | —13,0 | 0,3  | —16,4  | —15,6 | —0,8 | —34,2    | —34,8 | 0,6  |
| 1968 | 3,7                         | 3,6 | 0,1  | 2,1    | 2,0 | 0,1  | —        | —   | —   | —5,2                    | —4,9  | —0,3 | —14,0  | —13,6 | —0,4 | —        | —     | —    |
| 1969 | 1,0                         | 0,9 | 0,1  | —      | —   | —    | —        | —   | —   | —19,0                   | —18,6 | —0,4 | —      | —     | —    | —        | —     | —    |

Январь

| Год           | Влажность, % |    |   | Облачность, баллы |     |      | Влажность, % |   |   | Облачность, баллы |   |   | Влажность, % |   |   | Облачность, баллы |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------|--------------|----|---|-------------------|-----|------|--------------|---|---|-------------------|---|---|--------------|---|---|-------------------|---|---|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|               | ф            | в  | Δ | ф                 | в   | Δ    | ф            | в | Δ | ф                 | в | Δ | ф            | в | Δ | ф                 | в | Δ |           |   |   |   |   |   |   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|               |              |    |   |                   |     |      |              |   |   |                   |   |   |              |   |   |                   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|               |              |    |   |                   |     |      |              |   |   |                   |   |   |              |   |   |                   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Подарный Урал |              |    |   |                   |     |      |              |   |   |                   |   |   |              |   |   |                   |   |   | Кзыл-Орда |   |   |   |   |   |   |   |   | Тюлькүбас |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Июль          |              |    |   |                   |     |      |              |   |   |                   |   |   |              |   |   |                   |   |   | Июль      |   |   |   |   |   |   |   |   | Январь    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 1959          | 72           | 70 | 2 | 4,6               | 5,1 | -0,5 | —            | — | — | —                 | — | — | —            | — | — | —                 | — | — | —         | — | — | — | — | — | — | — | — | —         | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

где  $y$  — температура воздуха,  $x$  — упругость водяного пара;

$$y = 5,3x + 45 \text{ для Полярного Урала,}$$

$$y = 5,8x + 33 \text{ для Кзыл-Орды,}$$

$$y = 6x + 42 \text{ для Тюлькубаса,}$$

где  $y$  — относительная влажность воздуха,  $x$  — нижняя облачность.

Затем были определены расхождения между фактическими и вычисленными значениями, которые представлены в табл. 2.

Однако для определения надежности материалов наблюдений в данном случае нельзя использовать допуски [1], так как они установлены для пространственной изменчивости влажности. Поэтому на первом этапе можно рекомендовать проверку резко выделившихся расхождений.

Как видно из табл. 2, на ст. Кош-Агач выделяются значения температуры воздуха и упругости водяного пара в 1961 г., а на ст. Тургай — в 1963 г. При анализе материалов наблюдений этих станций установлено, что указанные данные действительно являются сомнительными.

Таким же образом была установлена сомнительность данных по нижней облачности на ст. Полярный Урал в 1962 г.

Приведенные примеры подтверждают возможность проведения контроля на ЭВМ данных наблюдений над влажностью воздуха в районах, где не удастся подобрать пары станций со сходными климатическими условиями, путем использования уравнений регрессии, вычисленных для значений двух элементов на одной станции.

## Выводы

1. Для проведения критического анализа данных наблюдений над влажностью воздуха в горных районах и в районах с редкой сетью станций можно рекомендовать подбирать пары станций, на которых наблюдается достаточно хорошая согласованность климатических условий.

2. В тех случаях, когда подобрать такие пары станций не удастся, можно использовать для контроля хорошо выраженные связи между средними месячными величинами упругости водяного пара и температуры воздуха, а также относительной влажности воздуха и нижней облачности.

3. Использование для контроля уравнений регрессии, связывающих характеристики влажности для пары станций, а также отдельные элементы на данной станции, позволяет перейти к контролю на ЭВМ материалов наблюдений станций, расположенных в сложных физико-географических условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по первичной обработке материалов метеорологических наблюдений. Гидрометеиздат, Л., 1957.
  2. Методические указания по контролю данных метеорологических наблюдений. Гидрометеиздат, М., 1968.
  3. Берлин И. А., Каган Р. Л. К вопросу об автоматизации контроля метеорологических данных. Труды ГГО, вып. 194, 1966.
  4. Берлин И. А., Светлова Т. П., Школяр Л. Ф. Применение линейной интерполяции для контроля результатов наблюдений. Труды ГГО, вып. 230, 1966.
  5. Глебова М. Я. Некоторые особенности распределения влажности воздуха в холмистом рельефе. Труды ГГО, вып. 147, 1963.
  6. Сапожникова С. А. Некоторые особенности климата оазисов в условиях Средней Азии. Труды ГГО, вып. 30, 1951.
  7. Берлин И. А., Школяр Л. Ф. К вопросу о критическом контроле данных влажности воздуха. Труды ГГО, вып. 194, 1966.
- 

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЦИОНАЛИЗАЦИИ СНЕГОМЕРНОЙ СЕТИ

Располагая данными структурной функции, можно оценить точность определения характеристик снежного покрова и перейти к выбору оптимальных параметров снегосьеомок, обеспечивающих достаточную точность [5, 6].

Погрешность определения средней высоты и плотности снежного покрова рассчитана на основании материалов экспериментальных снегосьеомок, выполненных по программе ГГО на выборочной сети станций в момент максимальных снегоотложений к началу таяния.

О зависимости средней абсолютной погрешности высоты снежного покрова от числа промерных точек и соответственно длины маршрута можно получить представление из табл. 1, которая содержит средние значения абсолютной погрешности высоты снежного покрова для УГМС, расположенных в основном в равнинных районах СССР.

При оценке погрешности обработка материалов производилась отдельно для открытых и защищенных участков (т. е. для одинаковых типов участков), что позволило получить представление об изменении абсолютной погрешности с изменением физико-географических условий.

Из табл. 1 видно, что одинаковое число промерных точек в УГМС обеспечивает различную абсолютную погрешность. В таблице приведены средние значения абсолютной погрешности за несколько зим, однако в отдельные зимы погрешность больше или меньше средней, что обуславливается влиянием прежде всего погодных условий данной зимы.

В безоттепельные зимы со слабым метелевым переносом абсолютная погрешность измерения высоты снежного покрова, как правило, невелика и ниже средней погрешности, т. е. погрешность измерения характеристик снежного покрова определяется совокупностью погодно-климатических условий и прежде всего режимом осадков, метелей и оттепелей.

Погрешность измерения характеристик снежного покрова может отчасти обуславливаться неполным соответствием одних и тех же элементов ландшафта в различных физико-географических зонах. Принимаемый в практике полевой участок для производства

снегомерных съемок в условиях тундры вряд ли будет тождественным таковому в южных степных зонах ЕТС и т. д.

Таблица 1

Зависимость средней абсолютной погрешности (см)  
высоты снежного покрова от числа промерных точек

| УГМС                                  | Число точек на маршруте |     |        |     |
|---------------------------------------|-------------------------|-----|--------|-----|
|                                       | полевом                 |     | лесном |     |
|                                       | 50                      | 100 | 50     | 100 |
| Мурманское                            | 3,0                     | 2,2 | 1,1    | 0,6 |
| Северо-Западное                       | 3,7                     | 2,7 | 1,8    | 1,4 |
| Северное                              | 3,8                     | 3,3 | 2,4    | 1,6 |
| Белорусской ССР                       | 3,6                     | 2,6 | 2,9    | 1,7 |
| Верхне-Волжское                       | 2,2                     | 1,4 | 1,6    | 1,1 |
| Центральных областей                  | 2,7                     | 1,8 | —      | —   |
| Центральных Чернозем-<br>ных областей | 3,9                     | 3,1 | —      | —   |
| Северо-Кавказское                     | 5,6                     | 5,2 | —      | —   |
| Приволжское                           | 3,3                     | 2,8 | 2,5    | 1,6 |
| Западно-Сибирское                     | 1,7                     | 1,6 | 1,2    | 0,9 |
| Казахской ССР                         | 5,2                     | 3,7 | —      | —   |
| Красноярское                          | 2,4                     | 2,1 | 1,5    | 1,4 |
| Якутское                              | 2,8                     | 1,9 | 1,6    | 1,1 |
| Иркутское                             | 1,4                     | 1,1 | 0,9    | 0,6 |
| Забайкальское                         | 1,9                     | 1,0 | 1,2    | 0,8 |
| Колымское                             | 3,6                     | 2,3 | 2,8    | 1,5 |
| Дальнего Востока                      | 1,5                     | 1,1 | 0,5    | 0,4 |
| Приморское                            | 1,8                     | 1,7 | 1,3    | 0,9 |

Таблица 1 показывает, что абсолютная погрешность невелика, даже на полевых участках, и не превосходит 4 см, за исключением южных зон ЕТС с неустойчивым залеганием снежного покрова и районов Казахстана, где погрешность превосходит 5 см. Заметно увеличивается погрешность (около 4 см) в УГМС Центральных Черноземных областей вследствие наличия оврагов и балок.

При одних и тех же параметрах снегомерных съемок погрешность на защищенных (лесных) участках значительно ниже, чем на открытой местности, т. е. для обеспечения одной и той же погрешности в лесных районах требуется значительно меньшее число промерных точек и соответственно меньшая длина снегомерного маршрута.

Сравнение показывает, что для большинства зон Сибири величина абсолютной погрешности на полевых и лесных участках примерно одного порядка.

Как известно, абсолютные погрешности той или иной величины не всегда являются показательными. Например, большие абсолютные погрешности могут оказаться не очень существенными при большой средней высоте снежного покрова и, наоборот, даже сравнительно небольшие абсолютные погрешности при малой высоте снежного покрова могут привести к значительным ошибкам. Поэтому для практических целей целесообразно знать относительную погрешность.

Зная абсолютную величину погрешности, можно вычислить относительное значение погрешности, если при этом известна средняя высота снежного покрова, т. е.

$$r = \frac{P_h}{\bar{h}} \cdot 100\%,$$

где  $P_h$  — абсолютная погрешность, а  $\bar{h}$  — средняя высота снежного покрова.

В табл. 2 приведены значения относительной погрешности высоты снежного покрова в зависимости от длины снегомерного маршрута ( $l$ ) и числа промерных точек ( $n$ ).

Таблица 2

Относительная погрешность (%) высоты снежного покрова  
для полевых участков

| Зона                         | Длина маршрута, км | Число точек на маршруте |    |    |     |
|------------------------------|--------------------|-------------------------|----|----|-----|
|                              |                    | 10                      | 20 | 50 | 100 |
| Европейская территория Союза |                    |                         |    |    |     |
| северная                     | 1                  | 18                      | 16 | 13 | 12  |
|                              | 2                  | 16                      | 12 | 11 | 10  |
| средняя                      | 1                  | 10                      | 7  | 5  | 5   |
|                              | 2                  | 8                       | 5  | 5  | 4   |
| южная                        | 1                  | 38                      | 36 | 36 | 36  |
|                              | 2                  | 38                      | 36 | 35 | 35  |
| Азиатская территория Союза   |                    |                         |    |    |     |
| северная                     | 1                  | 10                      | 9  | 9  | 9   |
|                              | 2                  | 7                       | 7  | 7  | 7   |
| средняя                      | 2                  | 7                       | 5  | 4  | 4   |
|                              | 1                  | 6                       | 5  | 4  | 4   |
| южная                        | 2                  | 5                       | 4  | 3  | 3   |
|                              | 1                  | 6                       | 5  | 4  | 4   |

Данные табл. 1 и 2 показывают, что как абсолютные, так и относительные погрешности зависят от числа промерных точек: с увеличением числа промерных точек и удлинением маршрута погрешность убывает. Однако увеличение числа измерений и удлинение маршрута не всегда способствуют уменьшению погрешности, т. е. повышению точности определения средней высоты

снежного покрова. Это относится прежде всего к северным зонам, где снежный покров характеризуется сравнительно большой горизонтальной изменчивостью, а также к зонам южной части ЕТС.

Из табл. 2 следует, что в зонах с устойчивым залеганием снежного покрова при необходимости обеспечения погрешности его высоты 2 см  $l$  и  $n$  должны быть равны 1 км и 20 точкам соответственно. В южных же зонах ЕТС указанная погрешность не обеспечивается даже при таких условиях, когда  $l=2$  км и  $n=100$ . Это указывает на то, что для обеспечения одной и той же точности, определяемой требованиями практики, нельзя пользоваться стандартными значениями  $l$  и  $n$  во всех зонах нашей страны.

Приведенные данные показывают, что различные сочетания  $l$  и  $n$  могут обеспечивать одну и ту же заданную точность (табл. 1). Например, в южных зонах АТС погрешность 1 см можно обеспечить при  $l=2$  км и  $n=20$  или при  $l=1$  км и  $n=50$ . В таких случаях  $l$  и  $n$  должны определяться степенью трудоемкости снего-съемки в той или иной зоне.

Выбор оптимального интервала времени между снегосъемками определяется погрешностями интерполяции высоты и плотности снежного покрова в промежутке между наблюдениями. Эта погрешность зависит от изменчивости изучаемых величин во времени, которая характеризуется временной структурной функцией.

Пользуясь временной структурной функцией и соответствующей расчетной формулой, можно выбрать частоту снегосъемок такой, чтобы погрешность интерполяции (средняя по всему интервалу за многолетний период) не превышала заданной величины [5, 6].

Изменчивость снежного покрова в течение зимы показала целесообразность разделения зимы на два периода: период нарастания и период схода снежного покрова (снеготаяния). В течение каждого из них изменчивость характеристик снежного покрова может считаться однородной [1, 8].

Для вычисления временной структурной функции высоты и плотности снежного покрова и соответственно погрешностей интерполяции рекомендуется использовать данные ежедневных наблюдений по постоянным рейкам за период не менее 10 лет в районах, где продолжительность устойчивого залегания снежного покрова длится от 3 до 5 месяцев. В районах с более продолжительными зимами этот период может быть и меньше.

При интервалах времени между наблюдениями, близких к нулю, временная структурная функция высоты снежного покрова также приближается к нулю. Это связано с тем, что при вычислении структурной функции для высоты снежного покрова используются данные ежедневных измерений по постоянным рейкам, погрешность которых сравнительно невелика.

О зависимости абсолютной погрешности интерполяции высоты снежного покрова от увеличения интервала времени между снегомерными наблюдениями можно получить представление из табл. 3 и 4. Погрешности интерполяции вычислены отдельно для полевых

и защищенных от ветра участков для периодов нарастания и схода снежного покрова.

Таблица 3

Абсолютные погрешности интерполяции высоты снежного покрова (см)  
для открытых участков

| УГМС                                  | Период, сутки |     |     |     |       |     |     |     |
|---------------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
|                                       | нарастания    |     |     |     | схода |     |     |     |
|                                       | 5             | 10  | 15  | 20  | 5     | 10  | 15  | 20  |
| Мурманское                            | 1,6           | 2,3 | 2,9 | 3,5 | 2,9   | 4,7 | 6,2 | 7,1 |
| Северо-Западное                       | 1,9           | 2,8 | 3,4 | 4,0 | 2,6   | 4,6 | 6,0 | 7,3 |
| Северное                              | 1,7           | 2,5 | 3,1 | 3,9 | 2,5   | 4,3 | 5,8 | 7,2 |
| Белорусской ССР                       | 1,6           | 2,4 | 3,0 | 3,4 | 2,2   | 3,6 | 4,7 | 6,1 |
| Верхне-Волжское                       | 1,8           | 2,6 | —   | 3,7 | 2,8   | 4,5 | —   | 6,2 |
| Центральных Чернозем-<br>ных областей | 1,8           | 2,3 | 2,8 | 3,2 | 2,2   | 3,0 | 5,4 | 7,3 |
| Северо-Кавказское                     | 2,7           | 3,9 | 4,3 | 6,5 | 3,8   | 5,1 | 6,9 | 3,3 |
| Приволжское                           | 1,7           | 2,4 | 3,0 | 3,4 | 2,2   | 4,5 | 6,1 | 7,2 |
| Омское                                | 1,2           | 1,6 | 2,1 | 2,4 | 2,1   | 3,3 | 4,7 | 5,6 |
| Западно-Сибирское                     | 1,4           | 2,0 | 2,3 | 2,7 | 1,9   | 3,2 | 4,4 | 5,0 |
| Казахской ССР                         | 1,5           | 2,1 | 2,5 | 2,8 | 1,7   | 3,1 | 4,0 | 4,3 |
| Красноярское                          | 1,6           | 2,3 | 2,8 | 3,2 | 2,0   | 3,1 | 3,9 | 4,6 |
| Якутское                              | 1,3           | 2,0 | 2,4 | 2,7 | 1,8   | 3,0 | 3,8 | 4,8 |
| Иркутское                             | 1,0           | 1,4 | 1,8 | 2,3 | 1,9   | 3,1 | 3,7 | 4,3 |
| Забайкальское                         | 0,6           | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,1   | 1,7 | 2,2 | 2,6 |
| Колымское                             | 2,8           | 3,9 | 4,6 | 5,2 | 2,7   | 4,9 | 6,3 | 7,6 |
| Дальнего Востока                      | 2,0           | 2,6 | 3,1 | 3,4 | 2,5   | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Приморское                            | 1,8           | 2,2 | 2,6 | 2,9 | 2,4   | 3,3 | 4,0 | 4,6 |

Погрешности интерполяции высоты снежного покрова на защищенных участках больше, чем на открытых. Эта особенность прослеживается для всей рассматриваемой территории. Погрешность интерполяции возрастает с увеличением временной структурной функции.

С увеличением интервала времени между снегомерными наблюдениями погрешность интерполяции заметно возрастает, причем как на открытых, так и на защищенных участках. Сравнение показывает, что абсолютные погрешности интерполяции высоты в период весеннего снеготаяния больше, чем в период нарастания. На защищенных участках погрешность интерполяции с увеличением интервала времени между наблюдениями возрастает быстрее, чем на открытых.

Следует отметить, что абсолютные погрешности не всегда являются определяющими при выборе оптимального интервала времени между снегомерными наблюдениями. Это объясняется тем, что большие абсолютные погрешности могут оказаться незначительными в случае большой средней высоты снежного покрова

и, наоборот, даже сравнительно небольшие погрешности при малой высоте снежного покрова могут привести к существенным ошибкам.

Таблица 4

Абсолютные погрешности интерполяции высоты снежного покрова (см)  
для защищенных участков

| УГМС                                  | Период, сутки |     |     |     |       |     |     |     |
|---------------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
|                                       | нарастания    |     |     |     | схода |     |     |     |
|                                       | 5             | 10  | 15  | 20  | 5     | 10  | 15  | 20  |
| Мурманское                            | 1,8           | 2,7 | 3,4 | 3,9 | 2,6   | 4,5 | 5,6 | 7,0 |
| Северо-Западное                       | 2,2           | 3,3 | 4,1 | 4,8 | 2,6   | 4,7 | 5,3 | 7,2 |
| Северное                              | 1,7           | 2,4 | 3,1 | 3,5 | 2,4   | 4,1 | 5,6 | 6,8 |
| Белорусской ССР                       | 1,6           | 2,8 | 3,8 | 4,9 | 2,3   | 4,0 | 6,0 | 7,2 |
| Верхне-Волжское                       | 2,4           | 2,7 | 3,2 | 4,2 | 2,8   | 4,7 | 6,7 | 3,0 |
| Центральных Чернозем-<br>ных областей | 2,0           | 3,0 | 3,7 | 4,4 | 2,7   | 4,8 | 6,6 | 8,3 |
| Северо-Кавказское                     | —             | —   | —   | —   | —     | —   | —   | —   |
| Приволжское                           | 2,2           | 3,3 | 4,2 | 5,0 | 3,4   | 5,8 | 6,9 | 8,2 |
| Омское                                | 1,2           | 1,9 | 2,4 | 2,9 | 3,0   | 5,1 | 6,7 | 8,3 |
| Западно-Сибирское                     | 1,3           | 1,7 | 2,5 | 3,0 | 2,6   | 4,2 | 5,5 | 7,2 |
| Казахской ССР                         | —             | —   | —   | —   | —     | —   | —   | —   |
| Красноярское                          | 1,3           | 1,6 | 2,4 | 2,8 | 2,4   | 3,3 | 4,8 | 6,2 |
| Якутское                              | 1,2           | 1,7 | 2,6 | 2,9 | 2,6   | 3,5 | 4,6 | 6,0 |
| Иркутское                             | 1,1           | 1,6 | 2,1 | 2,5 | 2,3   | 3,6 | 4,7 | 5,6 |
| Забайкальское                         | 0,9           | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,3   | 1,8 | 2,4 | 3,0 |
| Колымское                             | 1,5           | 2,0 | 2,4 | 2,8 | 2,1   | 3,1 | 3,8 | 4,1 |
| Дальнего Востока                      | 2,3           | 3,2 | 3,7 | 4,3 | 3,2   | 5,2 | 6,3 | 7,4 |
| Приморское                            | 2,6           | 3,4 | 3,9 | 4,4 | 3,3   | 4,9 | 5,9 | 7,1 |

Например, по данным М. В. Гущиной [1], на станциях Забайкалья относительные погрешности могут достигать 20%, а абсолютные погрешности интерполяции сами по себе являются незначительными. В условиях Украины относительные погрешности могут иметь еще большие значения.

Поскольку абсолютная погрешность изменяется в малых пределах и является менее показательной, при выборе интервала времени между наблюдениями удобнее пользоваться относительной погрешностью.

Данные, приведенные в табл. 5, показывают, что наибольшие величины относительной погрешности отмечаются в южных районах ЕТС, причем с увеличением интервала времени между наблюдениями они резко возрастают.

Выполненные разработки показывают, что при определении погрешности средней высоты снежного покрова и запасов воды в снеге необходимо учитывать статистическую структуру снежного покрова, как и любого другого поля метеорологического элемента.

Таблица 5

Относительная погрешность (%) интерполяции высоты снежного покрова

| Зона                            | Период, сутки |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
|---------------------------------|---------------|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|
|                                 | нарастания    |    |    |    |    | схода |    |    |    |    |
|                                 | 1             | 5  | 10 | 15 | 20 | 1     | 5  | 10 | 15 | 20 |
| Открытые участки                |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| Европейская территория<br>Союза |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| северная                        | 2             | 4  | 6  | 8  | 9  | 2     | 6  | 10 | 14 | 18 |
| средняя                         | 2             | 5  | 8  | 9  | 11 | 2     | 8  | 13 | 17 | 22 |
| южная                           | 6             | 13 | 18 | 22 | 26 | 4     | 15 | 25 | 32 | 40 |
| Азиатская территория<br>Союза   |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| северная                        | 2             | 6  | 2  | 9  | 12 | 2     | 6  | 10 | 13 | 17 |
| средняя                         | 1             | 3  | 4  | 6  | 8  | 2     | 3  | 8  | 11 | 14 |
| южная                           | 2             | 4  | 4  | 7  | 8  | 1     | 4  | 7  | 8  | 8  |
| Защищенные участки              |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| Европейская территория<br>Союза |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| северная                        | 1             | 3  | 5  | 6  | 7  | 1     | 4  | 7  | 10 | 13 |
| средняя                         | 1             | 4  | 6  | 8  | 9  | 2     | 6  | 10 | 15 | 18 |
| южная                           | —             | —  | —  | —  | —  | —     | —  | —  | —  | —  |
| Азиатская территория<br>Союза   |               |    |    |    |    |       |    |    |    |    |
| северная                        | —             | —  | —  | —  | —  | —     | —  | —  | —  | —  |
| средняя                         | 1             | 2  | 4  | 5  | 6  | 1     | 4  | 7  | 11 | 13 |
| южная                           | 2             | 4  | 6  | 9  | 10 | 2     | 5  | 9  | 10 | 10 |

Неучет этой структуры может привести к неправильным методическим выводам. Расчеты на основе большого материала снегомерных съемок свидетельствуют о том, что на территории СССР (включая горные районы) для обеспечения погрешности определения средней высоты и плотности снежного покрова 5—10% требуются различные параметры снегосъемок. Однако чтобы обеспечить сравнимость полученных данных, нами приняты более или менее однотипные параметры снегосъемок для всей территории нашей страны, которые приведены в табл. 6 для различных УГМС.

Табл. 6 показывает, что на территории СССР длина снегомерного маршрута и расстояние между пунктами смежных измерений высоты и плотности снежного покрова должны быть различными в зависимости от степени неравномерности распределения снежного покрова. В связи с этим объем снегомерных работ в том или

инном районе должен определяться с учетом характера распределения снежного покрова, т. е. его горизонтальной изменчивости.

Таблица 6  
Параметры снегосъемок

| УГМС                             | Длина маршрута, км | Число замеров |           |
|----------------------------------|--------------------|---------------|-----------|
|                                  |                    | высоты        | плотности |
| Мурманское                       | 2                  | 100           | 20        |
| Северо-Западное                  | 1                  | 50            | 10        |
| Северное                         | 2                  | 100           | 20        |
| Белорусской ССР                  | 2                  | 100           | 20        |
| Верхне-Волжское                  | 1                  | 50            | 10        |
| Центральных областей             | 2                  | 40            | 10        |
| Центральных Черноземных областей | 2                  | 100           | 10        |
| Северо-Кавказское                | 2                  | 100           | 20        |
| Приволжское                      | 2                  | 100           | 10        |
| Омское                           | 1                  | 50            | 10        |
| Западно-Сибирское                | 1                  | 25            | 10        |
| Казахской ССР                    | 2                  | 100           | 20        |
| Красноярское                     | 2                  | 100           | 20        |
| Якутское                         | 1                  | 20            | 10        |
| Иркутское                        | 1                  | 50            | 10        |
| Забайкальское                    | 1                  | 20            | 10        |
| Колымское                        | 1                  | 100           | 20        |
| Дальнего Востока                 | 1                  | 25            | 10        |
| Приморское                       | 1                  | 50            | 10        |

Расчеты погрешности интерполяции высоты и плотности снежного покрова на основе обширного материала ежедневных снегомерных наблюдений показывают, что интервалы времени между снегомерными съемками для обеспечения одной и той же погрешности 5—10% изменяются на территории СССР от 5—10 суток в районах с неустойчивым залеганием снежного покрова до 25—35 суток на большей части территории нашей страны.

В работе [10] приведены рациональные расстояния между снегомерными пунктами для различных районов страны, приемлемые при интерполяции высоты снежного покрова с заданной точностью.

Для гидрологических прогнозов и расчетов вероятная ошибка интерполяции должна быть равной 4%, средняя квадратическая ошибка 6% и возможная ошибка 15% [7].

В работе [10] приведено также расчетное число пунктов, необходимое для обеспечения заданной погрешности интерполяции, и число пунктов существующей в настоящее время снегомерной сети.

Сравнение показывает, что на большей части Европейской территории Союза, особенно в районах с устойчивым залеганием снежного покрова, число снегомерных пунктов существующей сети

значительно превосходит расчетное. Из этого следует, что необходимо упорядочить существующую сеть в указанных УГМС. Обратная картина наблюдается на большей части Сибири: существующая снегомерная сеть слишком редкая, чтобы обеспечить заданную погрешность интерполяции.

Для обеспечения заданной погрешности интерполяции в районах с неустойчивым снежным покровом требуется более густая сеть, чем существующая. Особенно выделяются южные районы Украины, Северного Кавказа, Казахстана и Узбекистана. Однако в районах с неустойчивым снежным покровом нет необходимости сгущать снегомерную сеть, поскольку снежный покров в этих районах залегает обычно непродолжительное время и как природный фактор не играет существенной роли.

Анализ приведенных данных показывает, что погрешность интерполяции высоты снежного покрова и соответственно густота снегомерной сети определяются пространственно-временной изменчивостью снежного покрова.

Разумеется, что при рационализации снегомерной сети необходимо решать целый комплекс вопросов (учет рационального размещения общей гидрометеорологической сети), в том числе вопрос о многообразии запросов различных отраслей народного хозяйства, заинтересованных в получении информации о снежном покрове.

Выполненные расчеты позволили оценить погрешности определения средней высоты и плотности снежного покрова и соответственно погрешности интерполяции и тем самым разработать рекомендации по выбору оптимальных параметров снегосъемок и производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологической сети станций и постов на равнинной территории СССР.

Точность измерения характеристик снежного покрова, как и любого другого метеозлемента, зависит от физико-географических особенностей той или иной территории, причем ведущая роль принадлежит погодно-климатическим условиям.

Поскольку значения пространственной структурной функции и погрешности интерполяции колеблются для территории СССР в больших пределах, то и параметры снегосъемок для обеспечения одной и той же точности неодинаковы для всей территории.

От точности измерения характеристик снежного покрова в районе отдельной станции зависит рациональное размещение станций снегомерной сети. Снегомерная сеть должна быть такой, чтобы могла обеспечивать точность учета характеристик снежного покрова между станциями, соответствующую точности их учета в пунктах наблюдений.

На равнинной территории нашей страны длина снегомерного маршрута и расстояния между смежными пунктами, в которых измеряются высота и плотность снежного покрова, должны быть различными в зависимости от степени неравномерности залегания снежного покрова по площади. В связи с этим объем снегомерных работ в том или ином районе должен определяться с учетом ха-

рактера распределения снежного покрова, его горизонтальной изменчивости.

Размещение пунктов снегомерной сети по территории в настоящее время характеризуется большой неравномерностью, определяемой исторически сложившимися условиями, временем и степенью хозяйственного освоения отдельных районов в нашей стране [10].

Для объективной оценки характеристик снежного покрова каждое УГМС должно иметь оптимальную снегомерную сеть с соответствующим числом пунктов снегомерных наблюдений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гущина М. В. и Трифонова Т. С. Об изменчивости характеристик снежного покрова во времени и о выборе интервалов между снегосъемками. Труды ГГО, вып. 108, 1960.
2. Дроздов О. А. и Шепелевский А. А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам построения метеорологических карт и рационализации сети. Труды НИУ ГУГМС, сер. I, вып. 13, 1946.
3. Дроздов О. А. О принципах рационализации сети метеорологических станций. Труды ГГО, вып. 123, 1961.
4. Комаров В. Д. Весенний сток равнинных рек ЕТС, условия его формирования и методы прогнозов. Гидрометеиздат, М., 1957.
5. Лайхтман Д. Л. и Каган Р. Л. Некоторые вопросы рационализации снегосъемок. Труды ГГО, вып. 108, 1960.
6. Лайхтман Д. Л. и Копанев И. Д. К обоснованию методики снегосъемок. Метеорология и гидрология, № 8, 1966.
7. Паршин В. Н. Точность учета снегосъемок в бассейне и ее влияние на точность прогноза объема половодья. Труды ЦИП, вып. 30 (57), 1953.
8. Трифонова Т. С. О пространственной изменчивости характеристик снежного покрова. Труды ГГО, вып. 130, 1962.
9. Урываев В. А. и др. Основные недостатки методов наблюдений над снежным покровом и осадками и предложения ГГИ по их улучшению. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
10. Копанев И. Д. О густоте снегомерной сети на равнинной территории СССР. Труды ГГО, вып. 260, 1971.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДОЖДЕМЕРА О-1М В КАЧЕСТВЕ ЭТАЛОННОГО (НАЗЕМНОГО) И СЕТЕВОГО ПРИБОРА

Дождемер О-1М предложен И. Н. Нечаевым в качестве сетевого прибора для измерения жидких осадков. Подробное описание дождемера и определение потерь собранных им осадков на смачивание приемной части прибора и на испарение из него между сроками измерений дано в работе [3]. В настоящей статье приводятся сравнительные наблюдения, которые были проведены для выяснения следующих вопросов.

1. При исследованиях погрешностей измерения жидких осадков в 1962—1964 гг. в качестве эталона использовалось ведро осадкомера Третьякова, установленное в яме [1]. Такая установка прибора позволяла избегать искажающего влияния скорости ветра. Потери на смачивание были известны и компенсировались введением соответствующей поправки. Потери собранных осадков на испарение отсутствовали, так как измерения производились после каждого дождя. С 1965 г. на экспериментальных базах по усовершенствованию методики измерения осадков для различных целей (например, для международных сравнений осадкомеров) в качестве эталона используется установленный в яме дождемер О-1М. Измерения по нему проводились два раза в сутки. Естественно поэтому сравнить показания обоих эталонных приборов с тем, чтобы убедиться, что они собирают одинаковое количество осадков и результаты различных сравнительных измерений, проведенных с тем или другим эталоном, вполне сопоставимы.

2. При рекомендации дождемера О-1М в качестве сетевого прибора предполагалось, что при установке его на высоте 2 м в ветровой защите осадкомера Третьякова он будет обладать точно такими же аэродинамическими свойствами, что и осадкомер Третьякова [3]. Однако в конфигурации приемной части дождемера О-1М есть одна особенность, отличающая ее приемную часть от ведра осадкомера Третьякова — это выступающие вверху во круг приемного отверстия края воронки. Необходимо было выяснить, не изменяет ли эти выступающие края аэродинамические свойства прибора и не внесут ли эти изменения сколько-нибудь серьезных нарушений в климатологические ряды наблюдений. Для выяснения этих вопросов использовались материалы специальных сравнительных наблюдений экспериментальных баз

в Нижнедевицке, Омске, Оле, Астраханке и Молдавской стоковой станции за 1967—1968 гг.

Для сравнения эталонных дождемеров, установленных в яме, осадки, собранные ведром осадкомера Третьякова ( $O_H$ ), измерялись после каждого дождя, а собранные дождемером О-1М — два раза в сутки. Кроме того, в Нижнедевицке были дополнительно установлены оба эти прибора и осадки измерялись после каждого дождя. При обработке данных в показания дождемеров вводились поправки на смачивание: 0,2 мм — для ведра осадкомера Третьякова и 0,1 мм — для дождемера О-1М.

В табл. 1 представлены результаты сравнения показаний наземных дождемеров для случаев, когда по ведру осадкомера Третьякова измерения производились после каждого дождя, а по дождемеру О-1М — два раза в сутки (А), и для случаев, когда по обоим дождемерам измерения делались после каждого дождя (Б).

Таблица 1

Сравнение показаний наземных дождемеров

| Станция                  | Сумма осадков |           | $\Delta = X_{O-1M} - X_{O_H}$ | $\delta = \frac{\Delta}{X_{O_H}} \%$ | Число измерений по O-1M |
|--------------------------|---------------|-----------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
|                          | $X_{O-1M}$    | $X_{O_H}$ |                               |                                      |                         |
| А                        |               |           |                               |                                      |                         |
| Нижнедевицк              | 389,9         | 400,2     | —10,3                         | —2,4                                 | 98                      |
| Омск                     | 448,8         | 452,0     | —3,2                          | —0,7                                 | 68                      |
| Молдавская сто-<br>ковая | 560,3         | 569,7     | —9,4                          | —1,7                                 | 74                      |
| Всего . . . . .          | 13 990        | 1421,9    | 222,9                         | —1,6                                 | 235                     |
| Б                        |               |           |                               |                                      |                         |
| Нижнедевицк              | 542,6         | 549,5     | —6,9                          | —1,3                                 | 244                     |

Во всех случаях имеется некоторое увеличение сумм осадков, собираемых дождемером  $O_H$ . Однако разница не превышает 1,6%, т. е. допустимого для двух одинаковых приборов предела [2]. Из рис. 1 а следует, что систематические расхождения между показаниями приборов настолько малы, что практически ими можно пренебречь. Они вызваны, очевидно, незначительным испарением из дождемера О-1М, так как на рис. 1 б расхождения практически отсутствуют. Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что оба дождемера практически собирают одинаковое количество осадков, причем, используя дождемер О-1М в качестве наземного эталонного прибора, нет необходимости проводить по нему измерения после каждого выпадения дождя.

Для сравнения показаний стандартного осадкомера Третьякова и дождемера О-1М, установленного в ветровой защите на высоте

2 м, измерения приборами проводились два раза в сутки. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2, из которых видно, что в этом случае несколько большее количество осадков систематически собирал дождемер О-1М. Это систематическое расхождение

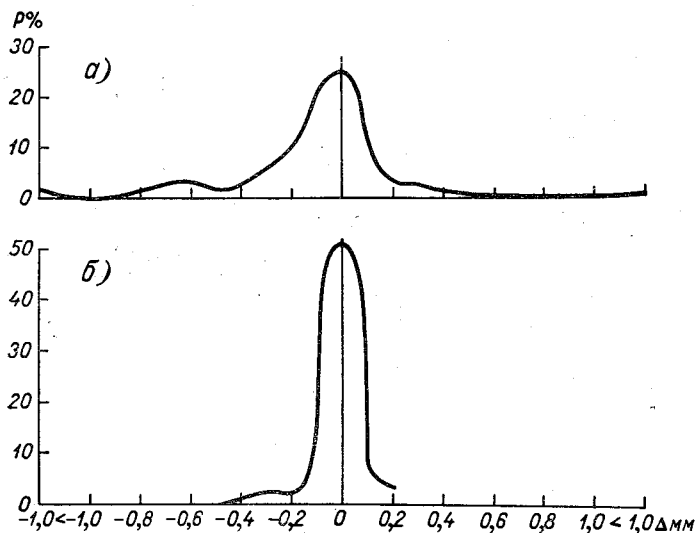


Рис. 1. Вероятность различий в показаниях наземного дождемера О-1М и ведра осадкомера Третьякова ( $O_H$ ).

а — при измерениях дождемером О-1М два раза в сутки, а осадкомером  $O_H$  после каждого выпадения дождя, б — при измерениях дождемером О-1М и осадкомером  $O_H$  после каждого выпадения дождя.

в показаниях приборов так же, как и в предыдущем случае, пренебрежимо мало и составляет 1%, т. е. опять-таки не превышает

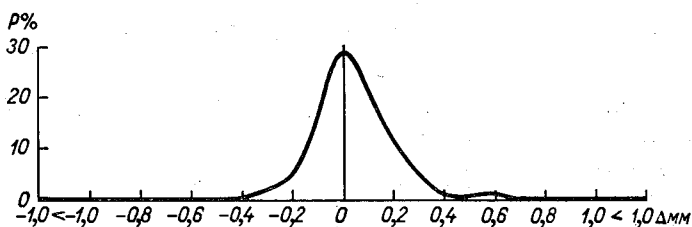


Рис. 2. Вероятность различий в показаниях дождемера О-1М в ветровой защите на высоте 2 м и стандартного осадкомера Третьякова.

допустимого расхождения в показаниях двух одинаковых дождемеров [2]. Объясняется оно испарением собранных осадков из осадкомера Третьякова. По данным И. Н. Нечаева [4], средняя многолетняя величина испарения собранных осадков для всех перечисленных выше пунктов, где велись наблюдения, составляет

примерно 3%. Если учесть эту величину, то получится тот же результат, что и при сравнении эталонных дождемеров, установленных в яме, — количество осадков, собранное стандартным осадкомером Третьякова, будет на 1—2% больше, чем собранное дождемером О-1М.

Таблица 2

Сравнение показаний дождемера О-1М в ветровой защите на высоте 2 м и стандартного осадкомера Третьякова

| Станция     | Сумма осадков |           | $\Delta = X_{O-1M} - X_{o.T}$ | $\delta = \frac{\Delta}{X_{o.T}} \%$ | Число измерений |
|-------------|---------------|-----------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
|             | $X_{O-1M}$    | $X_{o.T}$ |                               |                                      |                 |
| Нижнедевицк | 598,7         | 598,9     | —0,2                          | 0,0                                  | 198             |
| Омск        | 662,5         | 663,2     | —0,7                          | —0,1                                 | 210             |
| Астраханка  | 1253,6        | 1228,9    | 24,7                          | 2,0                                  | 198             |
| Ола         | 367,6         | 361,3     | 6,3                           | 1,7                                  | 134             |
| Всего       | 2882,4        | 2852,3    | 30,1                          | 1,0                                  | 740             |

### Выводы

1. Дождемер О-1М практически не имеет потерь на испарение собранных осадков.

2. При наземной установке показания дождемера О-1М равны показаниям эталонного дождемера  $O_H$  — ведра осадкомера Третьякова, установленного в яме.

3. При установке дождемера О-1М в ветровой защите его показания на высоте 2 м равны показаниям стандартного осадкомера Третьякова.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунова И. Г. Предварительные результаты исследований в Воейково погрешностей измерения жидких осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
2. Горбунова И. Г., Степанюк Т. П. Сравнение показаний наземных дождемеров различных конструкций. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
3. Нечаев И. Н. Выбор элементов конструкции новой модели дождемера. Труды ГГО, вып. 230, 1968.
4. Нечаев И. Н. Учет потерь на испарение из осадкомера при измерении осадков. Труды ГГО, вып. 244, 1969.

*И. А. ПОКРОВСКАЯ, Г. И. ПОЛУХИН,  
В. А. ПАРНИЩЕВ, Н. П. ФАТЕЕВ*

## **ЭТАЛОННЫЕ БАРОМЕТРЫ ГИДРОМЕТСЛУЖБЫ СССР**

Для воспроизведения и передачи единицы измерения атмосферного давления на сеть станций в Гидрометслужбе СССР служат эталонные ртутные барометры с интерференционным отсчетом № 3 и 4 конструкции Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ). Эталонные барометры хранятся в ГГО, где проводятся систематические работы по поддержанию их метрологических характеристик.

Результаты исследования барометров и сравнения их с ранее действовавшими эталонными барометрами устаревшей конструкции, проведенные в 1961—1962 гг. в помещении ЦБП при ГГО, опубликованы [1]—[3], там же дано краткое описание барометров. Из-за вибрации поверхности ртути работы с эталонными барометрами можно было проводить только ночью, когда прекращалось движение транспорта.

Впоследствии барометры № 3 и 4 были перенесены в новое здание ГГО. Для обеспечения надлежащих условий при работе с барометрами помещение, предназначенное для них, было оборудовано специальными устройствами для изоляции барометров от вибрации грунта и стен здания и обеспечения равномерного и постоянного во времени поля температуры. С момента переноса барометров с ними постоянно сравниваются образцовые барометры, посредством которых единица измерения атмосферного давления передается от эталона на сеть гидрометеорологических станций и в другие организации, где измеряется атмосферное давление.

Эталонные барометры № 3 и 4 являются также региональными эталонами в системе Всемирной метеорологической организации (ВМО).

### **Оборудование помещения**

Для устранения влияния вредных вибраций грунта, исходящих от соседних промышленных объектов и транспорта, эталонные барометры установлены на специальном виброизолирующем фундаменте. Схема фундамента показана на рис. 1.

Фундамент состоит из двух железобетонных блоков и системы стальных пружин, помещенных между блоками. Нижний блок I

имеет размеры  $4,4 \times 4,4 \times 0,8$  м. Он заглублен в грунт так, что его верхняя плоскость находится на уровне пола подвального помещения. Высота верхнего блока 2 составляет 2 м. Этот блок имеет две выступающие тумбы 4 сечением  $0,8 \times 0,8$  м и высотой 1,1 м, на которых установлены барометры. Тумбы проходят в помещение первого этажа, не касаясь перекрытия 5; зазоры между тумбами и полом закрыты мягкой прорезиненной тканью. В верхнем блоке заделаны три тавровые балки 3 для крепления на них вакуумной системы. Верхний блок лежит на 24 стальных пружинах, попарно заключенных в стальных коробчатых обоймах 6. Вес верхнего

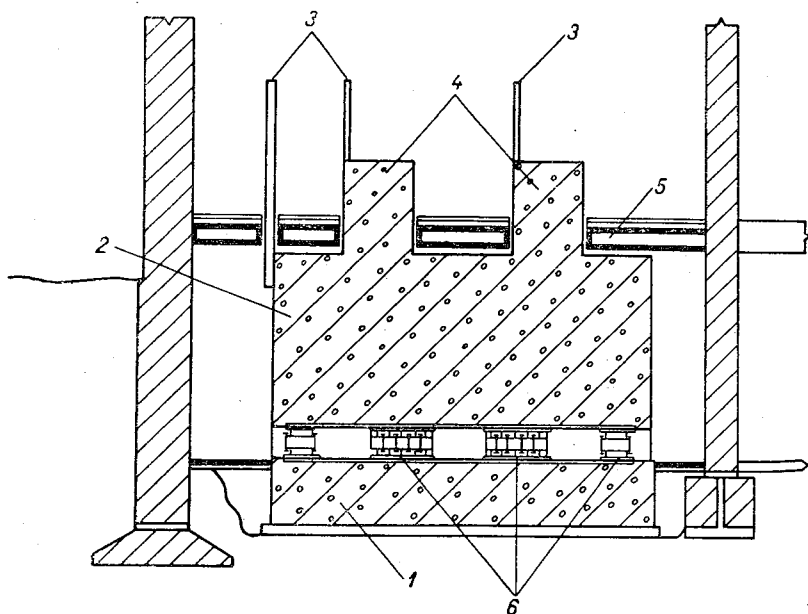


Рис. 1. Схема фундамента.

блока около 100 т. Частота собственных вертикальных колебаний фундамента около 2 гц. Грунт под фундаментом подвержен нестационарным колебаниям с широким спектром частот. Фундамент полностью изолирует барометры от влияния высокочастотных колебаний, но передает колебания, имеющие частоты, близкие к частоте его собственных вертикальных и вращательных колебаний вокруг горизонтальных осей. Последние вызывают боковую качку ртути, что мешает измерениям.

Для устранения этих колебаний в ГГО было разработано комбинированное демпфирующее устройство, состоящее из жидкостных и резиновых демпферов. Это устройство позволило в значительной мере ослабить резонансные низкочастотные колебания верхнего блока фундамента. Однако полностью исключить колебания не удалось, и при неблагоприятных условиях они влияют на качество измерений.

Эталонные барометры расположены в комнате размером  $6 \times 4 \times 3,1$  м с тамбуром при входе. Наружная стена с окном отделена прозрачной перегородкой, расположенной на расстоянии 1 м от окна. За перегородкой размещаются насосы вакуумной системы барометров. Для образцовых ртутных барометров установлен барометрический шкаф. Помещение оборудовано вытяжной вентиляцией.

Для стабилизации температурного режима барометров в помещении, кроме центрального отопления, установлены электронагреватели с автоматическим регулированием. Такие же нагреватели установлены в подвальном помещении около фундамента. В результате этого в помещении для эталонных барометров постоянно поддерживается температура  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ . Несколько более высокая температура иногда бывает летом, так как охлаждение помещения не предусмотрено. Для уменьшения градиентов температуры установлено четыре вентилятора, которые включаются перед началом сравнения барометров и в промежутках между отсчетами.

### Перенос барометров

После переноса в апреле 1965 г. барометры № 3 и 4 были установлены и юстированы специалистами ВНИИМа. Одновременно с перебазированием барометров была усовершенствована конструкция отсчетной системы барометров: уменьшено фокусное расстояние зрительной трубы с 75 до 50 мм, крепление зрительной трубы сделано более удобным для юстировки.

При переносе барометров лабораториями ВНИИМа были поверены стеклянные шкалы и пластины, притирающиеся к концевым мерам. Концевая мера барометра № 3 ремонтировалась (в связи с нарушением оптического контакта) и поверялась в 1964 г. Концевую меру барометра № 4 было решено не переаттестовывать, ввиду того что показания барометров хорошо согласовались между собой. Перед сборкой барометров была произведена чистка внутренних полостей и смотровых окон. Барометры были залиты новой ртутью марки Р-0.

Таблица 1

Результаты сравнения барометров  
в старом помещении

| Дата           | $\Delta H_{4-3}$ | $\sigma$ | $n$ |
|----------------|------------------|----------|-----|
| 8 IX 1964 г.   | +0,007           | 0,008    | 8   |
| 4 XI 1964 г.   | 0,000            | 0,018    | 20  |
| 13 III 1965 г. | -0,002           | 0,016    | 20  |

Таблица 2

Результаты сравнения барометров  
после установки их в новом  
помещении

| Дата         | $\Delta H_{4-3}$ | $\sigma$ | $n$ |
|--------------|------------------|----------|-----|
| 8 VI 1965 г. | -0,046           | 0,022    | 12  |
| 5 XI         | -0,023           | 0,023    | 10  |
| 16 XII       | +0,015           | 0,020    | 20  |
| 21 XII       | +0,033           | 0,014    | 20  |

В 1964—1965 гг. до переноса барометров было проведено три серии сравнений, которые показали, что барометры находятся в удовлетворительном состоянии. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Здесь  $\Delta H_{4-3}$  — разность показаний барометров № 4 и 3 в мм рт. ст.,  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение ряда,  $n$  — число отсчетов в серии.

После переноса барометров в 1965 г. было проведено четыре серии сравнений барометров (табл. 2). Первое сравнение (8/VI) проводилось до применения в фундаменте резиновых демпфирующих прокладок. Отсчеты были ненадежными из-за сильных колебаний менисков ртути. Сравнение 5/XI проводилось после дооборудования фундамента, а сравнения 16 и 21/XII — еще и после дополнительной юстировки.

### Работы по хранению барометров

Для обеспечения правильности показаний барометров ведется систематическая работа по поддержанию их метеорологических характеристик, а также по созданию надлежащих условий их хранения. К таким работам относятся поддержание вакуума в барометрическом колене над ртутью, периодическая юстировка барометров, чистка коротких колен, наблюдение за состоянием и профилактический ремонт механизмов, перемещающих концевую меру, наблюдение за системой терморегулирования, уход за насосами вакуумной системы, градуировка термопар, переаттестация и замена мер.

Остаточное давление над ртутью в промежутках между измерениями поддерживается так, чтобы оно не превышало  $5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Перед сравнением барометров остаточное давление доводится до  $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

Юстировка барометров производится по мере надобности и проверяется перед каждым сравнением барометров. Критериями удовлетворительного состояния юстировки барометров являются четкость интерференционной картины, горизонтальность и равномерность расположения интерференционных полос, одинаковые расстояния между полосами на верхней и нижней интерференционных картинах.

Наиболее уязвимым местом конструкции барометров является механизм, перемещающий концевую меру. В процессе работы с барометром червячная передача механизма постепенно срабатывается, следствием чего является нарушение вертикальности концевой меры при перемещении ее. Этот дефект может быть обнаружен при наблюдении в зрительную трубу за изображениями щелей коллиматоров. В случае неисправности подъемного механизма изображения щелей верхнего и нижнего коллиматоров при перемещении меры несколько смещаются относительно друг друга, чего быть не должно.

Неисправность подъемных механизмов была обнаружена у барометров в конце 1967 г. В феврале 1968 г. подъемные механизмы были отремонтированы и барометры были заново юстированы.

В 1967 г. у концевой меры № 3 (барометра № 3) нарушился оптический контакт между торцом меры и стеклянной пластиной. Ввиду того что меру надлежащим образом отремонтировать не удалось, в сентябре 1967 г. на барометр была установлена новая концевая мера № 11.

Необходимо поддерживать температуру воздуха в помещении на определенном уровне постоянно, а не только во время сравнений, так как масса барометров и особенно фундаментов велика и получить равномерное поле температур за короткое время практически невозможно.

Термопары, которые служат для измерения температуры барометров № 3 и 4, периодически градуируются вместе с гальванометрами. Градуировка производится по калориметрическим термометрам с ценой деления шкалы  $0,01^{\circ}$ . Градуировка проводится через 10 делений шкалы гальванометра. Результаты градуировки оформляются в виде уравнений прямых, по которым составляются рабочие таблицы. Градуировки термопар постоянны во времени. В табл. 3 приведены показания термопар в градусах, вычисленные по градуировкам разных лет, при отклонении указателя гальванометра на 10 делений шкалы. Термопары № 1—3 и 4—6 установлены соответственно на мере и колонке барометра № 3, термопары № 7—9 и 10—12 — на мере и колонке барометра № 4.

Таблица 3

Показания термопар в градусах при  $n=10$  дел.  
по градуировкам разных лет

| Номер<br>термо-<br>пары | Год  |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 1960 | 1961 | 1962 | 1964 | 1966 | 1969 |
| 1                       | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,19 |
| 2                       | 0,19 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,20 |
| 3                       | 0,22 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,19 | 0,18 |
| 4                       | 0,22 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,20 |
| 5                       | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,20 |
| 6                       | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,20 | 0,20 |
| 7                       | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,19 |
| 8                       | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,18 |
| 9                       | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,19 |
| 10                      | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,19 |
| 11                      | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,18 |
| 12                      | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,18 |

Точность и правильность показаний эталонных барометров систематически контролируются сравнением их показаний между собой.

## Погрешности измерения

Измерение атмосферного давления ртутным барометром сводится к измерению разности уровней ртути в закрытом и открытом коленах барометра и измерению остаточного давления в закрытом колене над ртутью. Для того чтобы выразить результат измерения в мм рт. ст., высота ртутного столба должна быть приведена к нормальным условиям, т. е. к плотности ртути при  $0^\circ$  ( $\rho_0 = 13,5951 \text{ г/см}^3$ ) и ускорению силы тяжести  $g_n = 980,665 \text{ см/сек}^2$ .

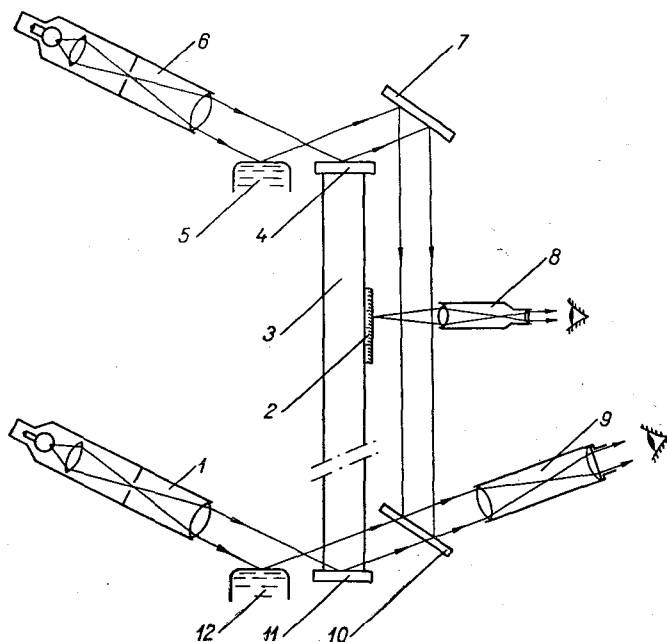


Рис. 2. Схема отсчетного устройства барометра.

Принципиальная схема отсчетного устройства барометра приведена на рис. 2. Измерение высоты ртутного столба осуществляется путем сравнения с концевой мерой 3, на торцах которой на оптический контакт насажены стеклянные пластины (боковички) 4 и 11. Поверхности боковичков, от которых отражаются лучи, алюминированы. На концевой мере укреплена стеклянная штриховая мера 2 длиной 100 мм с ценой деления 0,1 мм. Мера 3, коллиматоры 1 и 6, зеркала 7 и 10 и зрительная труба 9 смонтированы на подвижной каретке.

При измерениях устанавливают зеркальную плоскость нижнего боковичка 11 на уровне поверхности ртути 12 так, чтобы в трубе 9 была видна интерференция, после чего снимают отсчет с помощью неподвижного отсчетного микроскопа 8 по шкале 2 и окулярному микрометру микроскопа. Затем совмещают плоскости верхнего

боковичка 4 и верхнего уровня ртути 5 и снова снимают отсчет. В это же время измеряют температуру ртути и концевой меры.

Высоту ртутного столба при температуре  $t$  определяют по формуле

$$H_t = L_{t_1} + l_{t_1} + (a_1 - a_2)_{t_1} + (r_1 - r_2)k, \quad (1)$$

где  $L_{t_1}$  и  $l_{t_1}$  — длина концевой меры и боковичка соответственно при температуре  $t_1$ ,  $a_1$  и  $a_2$  — отсчеты по стеклянной штриховой мере,  $r_1$  и  $r_2$  — отсчеты по барабану окулярного микрометра,  $k$  — цена деления барабана (мм/дел.).

Подставляя значения длин мер при  $20^\circ$ , получим

$$H_t = L_0 [1 + \alpha_1(t_1 - 20^\circ)] + l_0 [1 + \alpha_2(t_1 - 20^\circ)] + (a_1 - a_2) [1 + \alpha_2(t_1 - 20^\circ)] + (r_1 - r_2)k, \quad (2)$$

где  $L_0$  и  $l_0$  — длина концевой меры и боковичка соответственно при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_1$  — коэффициент линейного расширения концевой меры,  $\alpha_2$  — коэффициент расширения стекла.

Приведение высоты ртутного столба  $H_t$  к высоте столба ртути при нормальной ее плотности и нормальному ускорению силы тяжести производят по формуле

$$H_0 = \frac{H_t g_m}{(1 + \beta t) g_n}, \quad (3)$$

где  $g_m$  — местное ускорение силы тяжести,  $\beta = 0,0001818$  — коэффициент объемного расширения ртути.

Таблица 4

Источники погрешностей и их оценка

| Источник погрешности                                                                                          | Погрешность измерения давления, мм рт. ст. $\cdot 10^3$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Погрешность длины концевой меры                                                                               | 0,2                                                     |
| Погрешность длины боковичка                                                                                   | 0,2                                                     |
| Погрешность градуировки стеклянной штриховой меры                                                             | 0,1                                                     |
| Погрешность определения цены деления барабана микрометра                                                      | 0,05                                                    |
| Погрешность отсчетов по барабану микрометра                                                                   | 2                                                       |
| Погрешность определения температуры меры (на $0,02^\circ$ )                                                   | 0,15                                                    |
| Наклон меры (на $6'$ )                                                                                        | 2                                                       |
| Наклон стеклянной шкалы ( $6'$ )                                                                              | 0,2                                                     |
| Неточность наведения на зеркало ртути из-за наличия волн от вибрации                                          | 10                                                      |
| Погрешность определения температуры ртути (на $0,02^\circ$ )                                                  | 3                                                       |
| Деформация верхних смотровых окон                                                                             | 3                                                       |
| Погрешность плотности ртути (принята $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г/см <sup>3</sup> )                                | 10                                                      |
| Погрешность определения остаточного давления                                                                  | 1                                                       |
| Погрешность определения местного ускорения силы тяжести (принята $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ см/сек. <sup>2</sup> ) | 2                                                       |

При сравнениях ртутных барометров приведение к нормальному ускорению силы тяжести не производят, так как влияние силы тяжести на сравниваемые приборы одинаково. Погрешности измерения атмосферного давления эталонными барометрами приведены в табл. 4. Четыре последние из перечисленных погрешностей при сравнении эталонных барометров не влияют на разность их показаний, так как одинаковы для сравниваемых приборов.

### **Методика сравнения барометров и результаты сравнения**

При измерении атмосферного давления эталонным барометром по методике, принятой в ГГО, отсчитывают положение сначала нижнего уровня ртути, затем верхнего и снова нижнего. За одно измерение принимается разность отсчетов положения верхнего уровня и среднего из двух отсчетов положения нижнего уровня ртути. При сравнении эталонных барометров отсчеты производят синхронно на каждом уровне. Если при этом с ним сравнивается барометр, у которого отсчет производится только на одном уровне (например, типа КР), то отсчет по этому барометру производится одновременно с отсчетом положения верхнего уровня ртути в эталоне.

Сравнение барометров обычно производится сериями по 20 измерений. Если температура достаточно постоянна, то подряд делают 5 измерений, после чего следует перерыв 30—60 мин., на время которого включают вентиляторы. Если же в сравнениях участвуют образцовые барометры типа КР, то сравнительные отсчеты делают через 15 мин., так как длительное присутствие наблюдателя у барометров КР влияет на показания его термометра и в результате измерения вносится ошибка из-за того, что показания термометра при барометре КР не соответствуют температуре барометра. При сравнениях температура по термометрам и термопарам отсчитывается при каждом измерении по барометру. Цена деления окулярного микрометра микроскопа контролируется при каждой серии сравнений.

Следует отметить, что синхронность отсчетов двух эталонов и какого-либо дополнительного барометра обеспечить трудно, так как из-за вибрации ртути приходится выжидать, когда будут четко видны интерференционные картины одновременно у обоих барометров. Несинхронность же отсчетов может привести к значительным погрешностям. Поэтому целесообразно отдельно проводить сравнения эталонов между собой, а другие барометры сравнивать с каким-либо одним из эталонов. Проводить сравнения таким образом следует и потому, что чем больше наблюдателей находится в помещении, тем труднее обеспечить надлежащий температурный режим барометров. Кроме того, при сравнении между собой только двух эталонов их короткие колёна можно соединить вакуумным шлангом с тем, чтобы избежать колебаний атмосферного давления.

По полученным отсчетам вычисляют показания каждого из барометров, приведенных к температуре  $0^\circ$ . Затем находят разности между показаниями барометров № 3 и 4 для каждого измерения и среднее значение разности для данной серии. Для характеристики отдельного значения разности показаний барометров вычисляют среднее квадратическое отклонение ряда для данной серии сравнений. В случае если с эталонами сравниваются другие барометры, в показания эталонов вводится поправка на остаточное давление над ртутью.

Результаты сравнения барометров № 3 и 4 за 1966—1970 гг. по отдельным сериям сравнений приведены в табл. 5 и 6. В таблицах приведены средние за серию разности показаний барометров  $\Delta H_{4-3}$  мм рт. ст., средние квадратические отклонения ряда  $\sigma$ , число измерений в серии  $n$ , давление  $p$ , при котором проводилось сравнение, и изменение давления  $\Delta p$  за время сравнения (4—5 час.). Кроме того, в таблицах приведены данные, характеризующие температурный режим барометров при сравнениях, а именно: максимальные значения разности температур по верхней и нижней термометрам для меры и для ртути  $t_{\text{верх}} - t_{\text{низ}}$ , разности температур меры и ртути  $t_{\text{м}} - t_{\text{рт}}$ , разности температур ртути барометров № 4 и 3  $t_4 - t_3$  и изменение температуры ртути за время сравнения  $\Delta t_{\text{рт}}$ .

Из табл. 5 видно, что в отдельных сериях сравнений, проведенных в 1966 г., разность показаний барометров в некоторых случаях достигала 0,06—0,07 мм рт. ст., причем при больших значениях разностей показания барометра № 3 всегда были ниже показаний барометра № 4. Эти расхождения слишком велики по сравнению со значениями  $\sigma$  в этих сериях, чтобы их можно было объяснить случайными погрешностями, вызванными колебаниями ртути при сравнениях. Температурные условия при этих сравнениях также ничем не выделялись. На показания барометра № 3, по-видимому, влияло то, что оптический контакт меры с нижней стеклянной пластиной был нарушен и пластина держалась только на шеллаке, который был нанесен на стеклянную пластину по периметру торца меры после установления оптического контакта между торцом меры и стеклянной пластиной. После установки на барометр № 3 в 1967 г. новой меры № 11 разности между показаниями барометров уменьшились и, как видно из табл. 6, только в отдельных случаях  $\Delta H$  достигает 0,03 мм рт. ст.

Среднее значение расхождения в показаниях барометров № 3 и 4, полученное по 37 сериям сравнений в течение 1967—1970 гг., составляет 0,011 мм рт. ст.

Средняя квадратическая погрешность  $\sigma$  одного измерения разности показаний барометров  $\Delta H_{4-3}$  вычислена по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \sigma_j^2 n_j}{N - k}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_j$  — среднее квадратическое отклонение в данной серии;  $n_j$  — число измерений в серии;  $N$  — число измерений за все серии;  $k$  — число серий.

Результаты сравнения барометров № 3 и 4 за 1966 г.

| Номер<br>серии | Дата    | $\Delta H_{4-3}$ | $\sigma$ | $n$ | $p$ | $\Delta p$ | $t_{\text{верх}} - t_{\text{низ}}$ |        | $t_m - t_{\text{пр}}$ | $t_4 - t_3$ | $\Delta t_{\text{пр}}$ |
|----------------|---------|------------------|----------|-----|-----|------------|------------------------------------|--------|-----------------------|-------------|------------------------|
|                |         |                  |          |     |     |            | мера                               | группа |                       |             |                        |
| 1              | 1 VII   | -0,002           | 0,023    | 20  | 754 | 0,0        | 0,10                               | 0,25   | 0,25                  | 0,10        | +0,45                  |
| 2              | 9 VII   | -0,012           | 0,014    | 20  | 748 | -0,2       | 0,10                               | 0,25   | 0,20                  | 0,10        | +0,35                  |
| 3              | 23 VII  | +0,048           | 0,013    | 20  | 754 | +0,5       | 0,10                               | 0,25   | 0,25                  | 0,10        | +0,55                  |
| 4              | 30 VII  | +0,055           | 0,015    | 20  | 756 | -0,1       | 0,10                               | 0,15   | 0,20                  | 0,10        | +0,55                  |
| 5              | 8 VIII  | +0,067           | 0,015    | 20  | 742 | +0,3       | 0,05                               | 0,05   | 0,15                  | 0,05        | +0,40                  |
| 6              | 17 VIII | +0,020           | 0,011    | 10  | 767 | +0,1       | 0,05                               | 0,15   | 0,20                  | 0,05        | +0,25                  |
| 7              | 18 VIII | +0,025           | 0,015    | 20  | 762 | +0,1       | 0,05                               | 0,10   | 0,20                  | 0,05        | +0,30                  |
| 8              | 21 X    | +0,023           | 0,012    | 20  | 765 | +0,5       | 0,10                               | 0,15   | 0,20                  | 0,10        | +0,60                  |
| 9              | 2 XI    | +0,056           | 0,010    | 20  | 768 | +0,3       | 0,10                               | 0,20   | 0,30                  | 0,10        | +0,45                  |
| 10             | 10 XI   | +0,013           | 0,013    | 20  | 756 | -0,9       | 0,05                               | 0,20   | 0,30                  | 0,15        | +0,55                  |
| 11             | 12 XI   | -0,002           | 0,019    | 20  | 765 | +0,4       | 0,05                               | 0,20   | 0,30                  | 0,05        | +0,70                  |
| 12             | 20 XI   | +0,041           | 0,027    | 20  | 770 | -2,8       | 0,05                               | 0,10   | 0,05                  | 0,20        | +0,20                  |
| 13             | 28 XI   | +0,035           | 0,017    | 20  | 761 | -0,6       | 0,10                               | 0,15   | 0,30                  | 0,10        | +0,80                  |
| 14             | 29 XI   | +0,015           | 0,019    | 12  | 757 | -0,4       | 0,05                               | 0,15   | 0,15                  | 0,10        | +0,20                  |
| 15             | 2 XII   | +0,003           | 0,035    | 10  | 752 | -0,3       | 0,05                               | 0,15   | 0,30                  | 0,05        | +0,35                  |

Результаты сравнения барометров № 3 и 4 за 1967—1970 гг.

| Номер<br>серии | Дата      | $\Delta H_{4-3}$ | $\sigma$ | $n$ | $p$ | $\Delta p$ | $t_{\text{верх}} - t_{\text{низ}}$ |       | $t_M - t_{\text{рт}}$ | $t_4 - t_3$ | $\Delta t_{\text{рт}}$ |
|----------------|-----------|------------------|----------|-----|-----|------------|------------------------------------|-------|-----------------------|-------------|------------------------|
|                |           |                  |          |     |     |            | мера                               | ртуть |                       |             |                        |
| 1              | 19 X 1967 | 0,000            | 0,011    | 20  | 755 | -0,2       | 0,05                               | 0,10  | 0,30                  | 0,25        | +0,30                  |
| 2              | 30 X      | +0,005           | 0,015    | 20  | 768 | +0,3       | 0,05                               | 0,15  | 0,25                  | 0,25        | +0,50                  |
| 3              | 4 XI      | +0,014           | 0,011    | 18  | 758 | +0,9       | 0,05                               | 0,10  | 0,25                  | 0,20        | +0,75                  |
| 4              | 11 XI     | +0,002           | 0,010    | 20  | 760 | +0,9       | 0,05                               | 0,10  | 0,20                  | 0,15        | +0,55                  |
| 5              | 14 XI     | +0,002           | 0,012    | 20  | 752 | +0,2       | 0,05                               | 0,10  | 0,25                  | 0,20        | +0,45                  |
| 6              | 16 XI     | +0,005           | 0,013    | 20  | 749 | +0,3       | 0,05                               | 0,10  | 0,25                  | 0,25        | +0,50                  |
| 7              | 21 XI     | +0,013           | 0,011    | 20  | 757 | -1,1       | 0,05                               | 0,10  | 0,15                  | 0,10        | -0,05                  |
| 8              | 28 XI     | -0,002           | 0,010    | 20  | 769 | +0,2       | 0,05                               | 0,05  | 0,20                  | 0,20        | +0,25                  |
| 9              | 30 XI     | +0,012           | 0,010    | 20  | 764 | 0,0        | 0,05                               | 0,05  | 0,10                  | 0,15        | +0,10                  |
| 10             | 26 I 1968 | -0,004           | 0,019    | 10  | 746 | 0,0        | 0,05                               | 0,15  | 0,20                  | 0,05        | +0,15                  |
| 11             | 13 II     | +0,007           | 0,011    | 20  | 756 | +0,3       | 0,05                               | 0,15  | 0,30                  | 0,15        | +0,35                  |
| 12             | 16 II     | +0,023           | 0,016    | 20  | 743 | +0,3       | 0,05                               | 0,05  | 0,20                  | 0,15        | +0,55                  |
| 13             | 21 II     | +0,016           | 0,017    | 12  | 758 | -0,9       | 0,05                               | 0,05  | 0,15                  | 0,20        | +0,15                  |
| 14             | 16 IV     | +0,032           | 0,006    | 8   | 760 | 0,0        | 0,05                               | 0,25  | 0,20                  | 0,05        | +0,10                  |
| 15             | 30 V      | +0,028           | 0,014    | 20  | 764 | -1,1       | 0,05                               | 0,15  | 0,20                  | 0,05        | +0,25                  |
| 16             | 9 VII     | +0,025           | 0,012    | 19  | 747 | +1,1       | 0,05                               | 0,05  | 0,20                  | 0,05        | +0,30                  |
| 17             | 19 VIII   | +0,021           | 0,009    | 20  | 758 | +0,3       | 0,00                               | 0,10  | 0,20                  | 0,05        | +0,40                  |

| Номер<br>серии | Дата        | $\Delta H_{4-3}$ | $\sigma$ | $n$ | $p$ | $\Delta p$ | $t_{\text{верх}} - t_{\text{низ}}$ |       | $t_M - t_{\text{гр}}$ | $t_4 - t_3$ | $\Delta t_{\text{гр}}$ |
|----------------|-------------|------------------|----------|-----|-----|------------|------------------------------------|-------|-----------------------|-------------|------------------------|
|                |             |                  |          |     |     |            | мера                               | глубь |                       |             |                        |
| 18             | 19 III 1969 | +0,003           | 0,014    | 20  | 757 | +0,4       | 0,05                               | 0,20  | 0,20                  | 0,10        | +0,10                  |
| 19             | 6 V         | +0,020           | 0,008    | 20  | 758 | +0,2       | 0,05                               | 0,10  | 0,25                  | 0,20        | +0,35                  |
| 20             | 20 V        | +0,010           | 0,014    | 20  | 757 | 0,0        | 0,00                               | 0,00  | 0,10                  | 0,05        | +0,20                  |
| 21             | 2 VI        | +0,018           | 0,010    | 20  | 757 | 0,0        | 0,05                               | 0,10  | 0,15                  | 0,05        | +0,25                  |
| 22             | 6 VI        | +0,013           | 0,020    | 20  | 761 | -0,4       | 0,05                               | 0,10  | 0,20                  | 0,05        | +0,40                  |
| 23             | 14 VII      | -0,007           | 0,022    | 20  | 754 | +0,2       | 0,00                               | 0,10  | 0,15                  | 0,10        | +0,40                  |
| 24             | 18 VII      | -0,005           | 0,022    | 20  | 758 | -0,8       | 0,05                               | 0,05  | 0,20                  | 0,10        | +0,40                  |
| 25             | 30 IX       | +0,022           | 0,010    | 20  | 758 | +1,0       | 0,10                               | 0,25  | 0,20                  | 0,15        | +0,30                  |
| 26             | 3 X         | -0,016           | 0,021    | 20  | 758 | +1,0       | 0,05                               | 0,20  | 0,20                  | 0,15        | +0,40                  |
| 27             | 12 XI       | +0,025           | 0,017    | 20  | 757 | +1,1       | 0,10                               | 0,25  | 0,20                  | 0,15        | +0,40                  |
| 28             | 17 XI       | +0,012           | 0,018    | 20  | 758 | -0,2       | 0,15                               | 0,45  | 0,15                  | 0,10        | -0,40                  |
| 29             | 16 II 1970  | -0,005           | 0,015    | 12  | 755 | -0,2       | 0,15                               | 0,25  | 0,25                  | 0,15        | +0,30                  |
| 30             | 25 III      | +0,022           | 0,013    | 20  | 766 | -0,8       | 0,05                               | 0,25  | 0,15                  | 0,10        | +0,35                  |
| 31             | 15 IV       | +0,004           | 0,020    | 20  | 760 | —          | 0,10                               | 0,35  | 0,45                  | 0,05        | +0,95                  |
| 32             | 26 V        | +0,018           | 0,026    | 20  | 759 | -0,1       | 0,05                               | 0,15  | 0,25                  | 0,15        | -0,35                  |
| 33             | 3 VI        | +0,013           | 0,027    | 20  | —   | —          | 0,05                               | 0,15  | 0,20                  | 0,10        | +0,50                  |
| 34             | 15 VI       | +0,014           | 0,015    | 20  | 757 | +0,2       | 0,05                               | 0,10  | 0,20                  | 0,50        | +0,25                  |
| 35             | 26 VI       | +0,017           | 0,021    | 20  | 761 | -1,4       | 0,05                               | 0,15  | 0,20                  | 0,15        | +0,65                  |
| 36             | 9 X         | +0,025           | 0,019    | 23  | —   | —          | 0,05                               | 0,20  | 0,20                  | 0,15        | +0,75                  |
| 37             | 28 X        | +0,006           | 0,020    | 20  | —   | —          | 0,05                               | 0,15  | 0,20                  | 0,15        | +0,50                  |

Средняя квадратическая погрешность  $\sigma$  одного измерения разности  $\Delta H_{4-3}$ , вычисленная по результатам сравнения, приведенным в табл. 6, составляет 0,017 мм рт. ст.

Принимая точность барометров одинаковой, среднюю квадратическую погрешность одного измерения по эталонному барометру получим равной  $\frac{0,017}{\sqrt{2}} = 0,012$  мм рт. ст.

Таким образом, результаты сравнения барометров показывают, что между показаниями эталонных барометров № 3 и 4 имеется систематическое расхождение 0,01 мм рт. ст., что составляет 0,001 % величины измеряемого давления. Показания барометра № 3 ниже, чем показания барометра № 4. Поэтому при сравнении образцовых барометров высокой точности с одним из эталонов в показания барометра № 3 следует вводить поправку +0,005 мм рт. ст., а в показания барометра № 4 — поправку —0,005 мм рт. ст.

Из данных, характеризующих температурный режим барометров (табл. 5 и 6), следует, что поле температуры барометров не вполне однородно, что является источником погрешностей при определении средних для данного измерения значений температур концевой меры и ртути. Наибольшая температурная погрешность при измерении давления обуславливается неправильной оценкой температуры ртути. Из табл. 6 следует, что максимальное расхождение между значениями температуры ртути, измеренной по верхним и нижним термопарам, в отдельных случаях достигает 0,3—0,4°. Для большинства же серий это расхождение не превышает для отдельных отсчетов 0,15°, а в среднем для серии не превышает 0,1°. В последнем случае при вычислении средней температуры ртути (по трем термопарам) ошибка, вероятно, не превышает 0,02°, что соответствует ошибке измерения давления 0,003 мм рт. ст. Ошибка определения температуры ртути, по-видимому, не может быть причиной систематического расхождения показаний барометров, так как вертикальное распределение температуры для данной серии сравнений, как правило, идентично для обоих барометров.

Для уменьшения температурных погрешностей помещение для эталонных барометров должно быть оборудовано более мощной терморегулирующей системой, в которой предусматривалась бы возможность охлаждения.

Анализ материалов сравнения показаний барометров подтверждает, что эталонные барометры № 3 и 4 соответствуют требованиям, предъявляемым к региональным эталонам ВМО.

## Выводы

1. Между показаниями эталонных барометров № 3 и 4 имеется систематическое расхождение, равное 0,01 мм рт. ст.
2. Средняя квадратическая погрешность одного отсчета барометра равна 0,012 мм рт. ст.

3. При сравнении с одним из эталонов образцовых барометров высокой точности в показания барометра № 3 следует вводить поправку  $+0,005$  мм рт. ст., а в показания барометра № 4 — поправку  $-0,005$  мм рт. ст.

4. Эталонные барометры № 3 и 4 соответствуют требованиям, предъявляемым к региональным эталонам ВМО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Покровская И. А., Лурье В. А. Результаты исследования новых эталонных барометров. Труды ГГО, вып. 160, 1964.
2. Долинский Е. Ф. и др. Метрологические работы в области механических измерений. Труды ВНИИМ, вып. 33 (93), 1958.
3. Покровская И. А. Хранение и передача на сеть станций единицы атмосферного давления. Труды ВМС, т. IX, Л., Гидрометеиздат, 1963.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОВЕРКИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С БОЛЬШОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Обычно поверка и градуировка датчиков и измерительных приборов производятся при условии обязательной стабилизации во времени значения физической величины, для измерения которой предназначен поверяемый первичный преобразователь, причем должно соблюдаться естественное требование, чтобы он принял значения этой величины (например, температуры). Но поскольку время выдержки пропорционально постоянной времени первичного преобразователя, то при больших значениях ее время выдержки при поверке возрастает настолько, что практически она становится нерентабельной.

Рассматриваемый метод поверки или градуировки позволяет уменьшить время выдержки в несколько раз при сохранении точности этих операций.

Отличительной особенностью метода является использование среды с меняющимся во времени по линейному закону значением величины вместо среды со стабилизированным значением величины, иначе говоря, применение динамического режима вместо стационарного.

Поскольку все зависимости и соотношения сохраняются для физических величин любой природы, то для конкретности можно вести изложение существа метода на примере температуры и термографа, широко применяемого, в частности, в метеорологических наблюдениях.

Для биметаллического термографа постоянная времени составляет около 15 мин. в спокойном воздухе. Хотя в условиях движения воздуха эта постоянная уменьшается, тем не менее при поверке в воздухе требуется трехчасовая выдержка при каждом значении температуры [1]. Таким образом, поверка при минимальном необходимом количестве поверяемых значений, равном трем, занимает не менее 9 час. Поэтому в настоящее время поверка термографов производится в условиях, резко отличающихся от условий эксплуатации — в жидкости. Из анализа взаимодействия датчика со средой следует, что существует возможность изменить процесс поверки.

Введем обозначения:

- $T$  — текущее значение температуры датчика,
- $T_0$  — начальное значение температуры датчика,
- $\theta$  — текущее значение температуры воздуха,

$\theta_0$  — начальное значение температуры воздуха,

$\tau$  — время,

$\lambda$  — постоянная времени датчика,

$\gamma$  — скорость изменения температуры воздуха.

Для среды с неменяющейся температурой и при отсутствии радиационного обмена (или при условии пренебрежения им) разность между температурой термометрического тела и средой описывается уравнением [2]

$$T - \theta = (T_0 - \theta_0) e^{-\frac{\tau}{\lambda}}.$$

Из уравнения следует, что если конечную разность между температурами термометрического тела и среды принять равной 1% первоначальной разности, то необходимо положить  $\tau = 5\lambda$ .

Следовательно, если  $\lambda = 15$  мин., а  $T_0 - \theta_0 = 30^\circ \text{C}$  (термограф, длительно находившийся в комнате при  $T_0 = \theta_0 = 20^\circ \text{C}$ , помещается в воздушную камеру при  $\theta_0 = -10^\circ \text{C}$ , то конечная разность  $T - \theta = 0,3^\circ \text{C}$  через 1 час 15 мин. Это оправдывает необходимость выдержки прибора при каждом значении температуры в течение 3 час. по упомянутой методике.

Разность между температурой термометрического тела и температурой среды, которая линейно изменяется во времени со скоростью  $\gamma$ , описывается уравнением

$$T - \theta = (T_0 - \theta_0 + \gamma\lambda) e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \gamma\lambda.$$

Из этого уравнения следует, что при  $\tau \rightarrow \infty$  первое слагаемое стремится к нулю, а второе от времени не зависит и определяется только  $\lambda$  и  $\gamma$ .

В предположении прежних условий и числовых значений положим  $\gamma = -0,005$  град/сек., или  $\gamma = -0,30$  град/мин. (при такой скорости понижения температуры можно произвести безошибочные отсчеты).

Если положить  $T_0 - \theta_0 = 0$ , что практически достигается предварительным размещением термографа в камере за несколько часов до поверки, то через 1 час 15 мин. (т. е.  $\tau = 5\lambda$ ) после начала изменения температуры разность между температурами термометрического тела и окружающей среды будет представлять постоянную

(с точностью до множителя  $e^{-\frac{\tau}{\lambda}}$ ) во времени известную величину, т. е.

$$T - \theta = 0,01\gamma\lambda - \gamma\lambda = -0,01 \cdot 4,5^\circ + 4,5^\circ \simeq 4,45^\circ,$$

которую следует вводить в качестве поправки. Еще через 90 мин. будет достигнута температура  $-30^\circ \text{C}$ .

Таким образом, вся поверка займет 2 часа 45 мин. вместо требуемых 9 час., согласно прежней методике, при этом поверка может быть осуществлена при нескольких значениях температуры.

При использовании рассмотренной методики необходимо знать величину постоянной времени поверяемого или градуируемого

прибора и скорость изменения значения величины во времени, при этом предполагается, что постоянная времени образцового средства измерения намного меньше постоянной времени поверяемого прибора. Обычно для серийного прибора постоянная времени известна или несложно определяется с желаемой точностью. Скорость же изменения значения величины может быть задана в любой камере, не содержащей автоматических устройств, но, конечно, для полного использования всех преимуществ динамического режима поверки целесообразнее воспользоваться камерой с программным заданием значений величины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по поверке метеорологических и аэрологических приборов. Гидрометеиздат, Л., 1948.
2. Качурин Л. Г. Электрические измерения аэрофизических величин. Высшая школа, М., 1967.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АБСОЛЮТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА СЕТЬ

Единство измерений какой-либо физической величины достигается строгим соблюдением поверочных схем, которые устанавливают иерархическую структуру передачи размера единицы рабочим средствам измерения; эта особенность отражается во французском названии *schéma d'hiérarchie* [1]. Согласно такой всесторонне теоретически обоснованной и проверенной схеме, передача размера единицы всякой физической величины происходит по нисходящим ветвям от исходных образцовых средств измерений к подчиненным средствам измерений. Очевидно, что подобная схема, хотя и оправдана, но обладает несомненными недостатками: значительными затратами времени и средств; невозможностью передачи единицы с точностью, приближающейся к точности образцовых приборов, ввиду того что на каждой ступени передачи единицы происходит накопление ошибок; необходимостью при организации поверки доставлять рабочие средства измерений к месту расположения соответствующего образцового средства, поскольку в противном случае транспортировка последнего связана с неизбежной потерей точности и, наконец, потребностью в эталонах, воспроизводящих производную физическую величину, которые для ряда величин отсутствуют.

Вместе с тем требования, предъявляемые к точности измерений, и в частности метеорологических, как к основному виду оперативной научной информации, возрастают и приближаются к требованиям, предъявляемым к измерениям по образцовым приборам. Кроме того, в ряде измерений, в особенности метеорологических, подчас затруднительно и экономически невыгодно доставлять рабочие измерительные приборы к стационарной поверочной установке. Таким образом, возникает противоречие между объективно возникающими требованиями и возможностями их удовлетворения существующими способами. Это противоречие может быть разрешено не организационным путем, а только с помощью технических качественно нового способа передачи размеров единиц производных величин на сеть, без нарушения, однако, установившихся обоснованных поверочных схем для основных физических величин.

Поскольку при поверке происходит фактически передача размера единицы, что связано с заданием величины и ее измерением образцовым прибором, поверенным по образцовому прибору более

высокого разряда, то следует требовать, чтобы образцовый прибор подвергался наименьшему числу влияющих воздействий, а оставшиеся воздействия могли бы контролироваться. Такая задача имеет решение благодаря существованию абсолютных способов измерений. Точность измерения, достигаемая при использовании этих способов, определяется только точностью измерения основных физических величин при строгом соблюдении спецификаций прибора [1]. Таким образом, если задаваемая в поверочной установке производная физическая величина (например, скорость потока, влажность, давление) стабильна во время процесса поверки, то при точном измерении может быть воспроизведено с высокой степенью точности любое значение этой величины, в том числе и то, которое принято за единицу. Отсюда следует, что имеется возможность отказаться от существующих поверочных схем для производных физических величин, и при этом, однако, не нарушать поверочные схемы для основных физических величин. В зависимости от того, к какому разряду принадлежат образцовые меры, вещества и приборы, передающие размер единиц основных физических величин и с помощью которых реализуется абсолютное измерение производной физической величины, прибор, его осуществляющий, также может быть отнесен к соответствующему разряду. В совокупности с устройствами, задающими значения производной физической величины, эти абсолютные приборы образуют, по существу, многозначные меры того или иного разряда производной физической величины, в том числе и высшего разряда, и даже могут рассматриваться как специальные эталоны, т. е. в соответствии с определением последних как эталоны, обеспечивающие воспроизведение единицы в особых условиях и заменяющие для этих условий первичный эталон. Описанный способ, очевидно, полностью разрешает вышеуказанное противоречие и позволяет, по крайней мере в ведомственных пределах (например, в Гидрометслужбе), уже к настоящему моменту осуществлять поверку рабочих (сетевых) приборов или образцовых средств измерений метеорологических параметров с точностью, значительно превосходящей существующую, представляя в организационном и экономическом отношении намного более выгодную систему поверки.

В качестве примера рис. 1 иллюстрирует систему поверки приборов, измеряющих метеозлементы, представляющие собой производные физические величины: давление, скорость ветра и влажность. Для сравнения слева приводится схема, иллюстрирующая существующую систему, реализуемую для каждой производной физической величины в отдельности и при которой размер единицы этой величины передается по многоступенчатой схеме. В соответствии с вышеизложенным передача единиц производной физической величины, относящейся к механическим и тепловым явлениям, в рассматриваемой системе достигается использованием единицы и воспроизводящих их эталонов только четырех основных физических величин: массы, длины, времени и температуры. В этом случае для точного измерения и, следовательно, передачи значения давления,

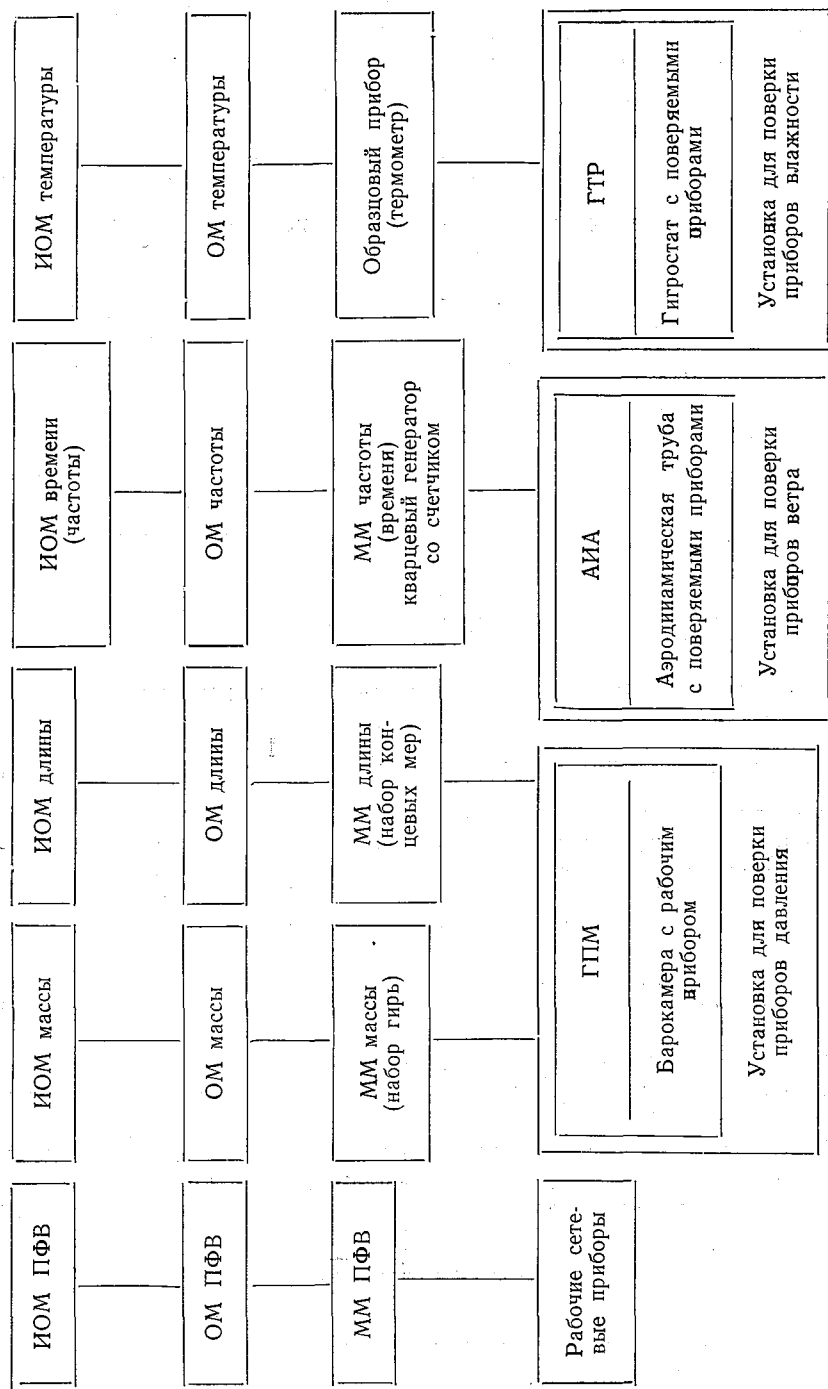


Рис. 1.

ИОМ — исходная образцовая мера, ОМ — образцовая мера, ММ — многозначная мера, ПФВ — производная физическая величина, ГПМ — грузопоршневой манометр, АИА — акустический импульсный анемометр, ГТР — гигрометр точки росы.

пользуясь нулевым методом сравнения, можно уравновесить давление газа (воздуха) набором тарированных гирь и, зная площадь поршня [2], рассчитать давление по формуле

$$p = \frac{mg}{s}.$$

Здесь  $m$  — общая масса грузов и поршня;  $s$  — площадь поршня;  $g$  — ускорение силы тяжести, являющееся величиной постоянной для данной точки Земли и, следовательно, выполняющее здесь роль физической константы. Проверка же площади поршня требует передачи единицы длины. Таким образом, для передачи единицы давления на сеть необходимо передавать единицу массы и единицу длины. Задание требуемого значения давления производится в барокамере.

Для передачи единицы скорости воздушного потока можно воспользоваться акустическим импульсным двухканальным анемометром с расположением осей акустических каналов под углом к потоку (для устранения аэродинамической тени в сечении потока) [3].

Скорость, измеряемая таким анемометром, выражается формулой

$$v = \frac{d}{t \cdot \sin 2\alpha} \cdot N,$$

где  $d$  — длина акустического канала,  $\alpha$  — угол между вектором потока и осью каналов,  $N$  — число импульсов, сосчитанных счетчиком.

Если  $\alpha = 45^\circ$  (задается шаблоном),  $t = \frac{1}{f} n$  (где  $f$  — частота кварцованного генератора, а  $n$  — число периодов колебаний этого генератора, сосчитанных вспомогательным счетчиком и образующим совместно с генератором точное реле времени), то

$$v = \frac{N}{n} df.$$

Задание скорости потока осуществляется в аэродинамической трубе.

Из последней формулы видно, что для передачи единицы скорости воздушного потока необходимо передавать единицу длины и времени (частоты).

Для передачи единицы влажности можно воспользоваться жесткой термодинамической зависимостью между температурой и упругостью насыщенных водяных паров, выраженной соотношением

$$E = E_0 \cdot \exp \frac{L}{k} \frac{T - T_0}{TT_0}$$

и для практических целей табулированной в виде международных таблиц упругости водяного пара.

Из формулы следует, что если для передачи единицы влажности значения ее задавать в гигростате, то указанная зависимость реализуется в гигрометре точки росы [4].

Методическая погрешность передачи единицы производной физической величины определяется погрешностью мер основных физических величин (длины, массы, времени, или частоты, и температуры), которые очень стабильны во времени (например, концевые меры для проверки длин баз анемометра, набор грузов для грузопоршневого барометра, кварцевый генератор, вода для воспроизведения реперных точек при передаче единицы температуры или платиновый образцовый термометр) и не изменяются при транспортировке.

Инструментальные же погрешности упомянутых приборов сводятся к минимуму благодаря соблюдению особых для каждого прибора правил, приемов и норм, выработанных на основе исследований абсолютных приборов, например: совокупность приемов для уменьшения трения между поршнем и цилиндром в грузопоршневом барометре; симметрирование каналов акустического анемометра; поддержание поверхности зеркальца в чистоте для устранения погрешностей от проявления эффекта Рауля и т. д.

В настоящее время в ГГО проводится работа по реализации рассмотренной системы путем создания специальных подвижных средств поверки [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263—70. Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, М., 1970.
2. Гаевский Н. А., Полухин Г. И., Лоскутов Г. И. Вторичный эталон абсолютного давления. Измерительная техника, № 4, 1970.
3. Фатеев Н. П., Резников Г. П., Попов М. В. Об использовании ультразвукового анемометра с цифровой индикацией средней скорости в качестве контрольного прибора при поверке и градуировке датчиков ветра. Труды ГГО, вып. 240, 1969.
4. Фатеев Н. П., Резников Г. П., Рогалев Ю. В. Реализация абсолютного метода задания и измерения влажности. Труды ГГО, вып. 260, 1971.
5. Фатеев Н. П. Проект подвижной поверочной метеорологической лаборатории. Труды ГГО, вып. 260, 1971.

## МОДЕЛЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

Методы измерения влажности газов в настоящее время исчисляются десятками, а разновидностей приборов, основанных на них, еще больше. К тому же за последнее время предложено дополнительно несколько методов и разработано много приборов для измерения влажности, что свидетельствует не столько о широком фронте поиска новых методов, сколько о возможных, но пока еще не открытых методах. Очень большое число комбинаций требований, предъявляемых к методам или приборам для измерения влажности газа, также влияет на число разновидностей последних. Таким образом, потребности в области исследований методов и конструирования приборов для измерения влажности газов уже не могут быть удовлетворены простым перечнем их с соответствующими характеристиками или объединением их в группы по произвольно выбранному признаку, как это сделано в обзорах, статьях и монографиях. Так, например, в статье [1] методы и приборы для измерения влажности, которые описаны достаточно полно, подразделяются на электрические, акустические и оптические. В монографии [2] наряду с обзором методов измерения приводится сводная таблица, в которой методы объединяются в группы по количеству времени, необходимому для измерения, т. е. по признаку, по мнению самого автора, весьма условному: интегральные, промежуточные и мгновенные. Монография [3] содержит физически глубокий с количественными зависимостями анализ ряда методов, но в ней отсутствует даже в неявном виде (т. е. в плане построения изложения) указание на связь между методами. В работе [4] приводится классификация по признаку, сходному с примененным в [1].

Статья [5] подразделяет все существующие методы измерения влажности газов на две большие группы — специфические и неспецифические. К специфическим относятся методы, основанные на непосредственном измерении физических свойств влажного газа и представляющих собой адаптированные общие физические методы газового анализа. Специфические методы составляют боль-

шую группу; они характеризуются использованием конденсированной фазы водяного пара и условно еще подразделяются на методы, объединяемые по признаку образования конденсированной фазы из водяного пара газовой фазы (сюда относятся методы с полной конденсацией водяного пара, в том числе сорбционные, и методы, основанные на термодинамических свойствах, характеризуемых диаграммой «давление — температура» для  $H_2O$ ) и по признаку обратного воздействия (реакции) водяного пара газовой фазы на конденсированные системы (психрометрический, температурно-равновесный, дилатометрический, электрохимический).

В [6] предпринята попытка классификации всех известных в настоящее время методов. Интуитивно методы объединены и расположены более удачно, чем в работах [1]—[5]. Однако очевидное отсутствие последовательности принципа, положенного в основу классификации, привело также к противоречиям и ошибкам. Так, пневматический метод отнесен сознательно к адсорбционному, поскольку в образцовой ветви пневматического мостика используется поглотитель водяных паров, тогда как это всего лишь технический прием, а метод основан на зависимости вязкости газовой смеси от влажности. Методы акустический, термокондуктометрический и диффузионный составили самостоятельную группу, отделенную от радиационных группой сорбционных. Вследствие этого не прослеживается связь между методами.

В [7] содержится описание только основных методов и приборов для измерения влажности.

Материалы Международного симпозиума по влажности [8] также не содержат рациональной классификации, и методы объединены в группы в следующей последовательности: психрометрические, конденсационные, электрические, спектроскопические, кулонометрические, а все, не вошедшие ни в одну из них, образуют группу под названием «Различные методы». В основу этой неявной классификации положен также случайный признак — степень распространенности метода.

Наконец, признавая [9] лучшей работой последних лет по полноте представленных материалов, стройности изложения и глубине физических обоснований, нельзя не отметить отсутствие единого подхода к измерениям влажности, при котором можно было бы видеть взаимную связь методов и переходы между ними. Вследствие этого диффузионный метод выделен как самостоятельный; электролитический подогревный входит в одну группу с конденсационным на основании сходства только одного признака — равновесия фаз, а порядок рассмотрения методов получается произвольным.

Несовершенство многих классификаций заключается в смешении понятий процессов и принципов, положенных в основу измерения параметров, на значения которых влияет влажность. Но если даже исключить это обстоятельство, то основной недостаток этих классификаций — объединение в группы и расположение их по внешнему, произвольно принятому признаку — остается.

Искусственный и произвольный характер этих классификаций обусловлен тем, что они являются формальными классификациями. Основным же принцип формальной классификации требует наиболее четкого и резкого обособления элементов одной группы от элементов других групп. Вследствие этого исключается возможность проследить внутренние закономерные необходимые связи между группами, в данном случае между методами измерения влажности.

Как известно [10], от этих недостатков свободна классификация содержательная, которая опирается не на формальные, а на диалектические принципы. Конечно, содержательные классификации не отвергают формальные, и последние являются не только ступенью на пути к содержательным, но имеют большое практическое значение. Например, классификация методов измерения влажности по чувствительности позволяет выбрать оптимальный вариант измерения с учетом сложности метода. Однако содержательные классификации представляют теоретическое обобщение, при котором между классифицируемыми предметами обнаруживаются такие отношения (например, переходы, общие признаки), которые исчезали из поля зрения при первоначальном, формальном подходе. И это обусловлено тем, что основой для установления таких отношений служит некоторый объективный закон, охватывающий данный круг предметов или явлений.

Следовательно, при содержательной классификации методов измерения влажности после четкого исключения технических приемов измерения параметров необходимо принять во внимание, что все эти методы основаны на физических явлениях, связанных прежде всего со свойствами молекулы воды как структурного образования и эффектами, проявляющимися при взаимодействии их между собой и с молекулами других веществ.

Если с этой точки зрения анализировать методы измерения влажности, то можно обнаружить однозначное соответствие свойств молекул, отношений, связей между ними и молекулами других веществ физическим принципам и эффектам, на которых основаны методы измерения влажности. Совокупность физических условий, обеспечивающих осуществление или воспроизведение физического процесса, назовем физической ситуацией. Физические ситуации отличаются друг от друга степенью сложности, т. е. количеством условий — частей (молекул), их отношений и связей.

Затем, вместо того чтобы классифицировать имеющийся набор методов, будем строить модель классификации, переходя от простых физических ситуаций ко все более сложным и ставя в соответствие каждой ситуации известные процессы или физические эффекты, положенные в основу методов. Таким образом, соответствие усложнения физической ситуации новым физическим эффектам и составляет тот объективный закон, который должен быть положен в основу содержательной классификации, а естественная последовательность расположения физических ситуаций определит

порядок расположения соответствующих методов измерения влажности.

Перейдем непосредственно к описанию физических ситуаций и намеченной модели классификации.

Самой простой в описываемом ряде физических ситуаций является такая, при которой из рассмотрения исключается даже влияние молекул воды друг на друга. В этом случае молекулы можно обнаружить только по проявлению внутренних свойств каждой из них. Методами, соответствующими такой ситуации, являются метод ядерного магнитного резонанса, масс-спектроскопический и электронно-спектроскопический [11]. Порядок расположения методов в этой молекулярно-параметрической группе также определяется однозначно по степени сложности внутримолекулярных процессов: масс-спектроскопический (определяется масса иона  $\text{OH}^+$ ), ядерного магнитного резонанса (основан на магнитных свойствах ядра водорода), электронно-спектроскопический (основан на учете энергетических потерь монохроматического электронного пучка).

Если при дальнейшем рассмотрении принимать во внимание взаимодействие молекул парообразной воды друг с другом и с молекулами других газов, в смеси с которыми обычно находятся водяные пары, то такая физическая ситуация учитывает свойства совокупности молекул, образующих парогазовую смесь. Присутствие молекул воды в такой смеси влияет на степень поглощения и излучения радиационных потоков в разных участках спектра, на свойства смеси (теплопроводность, вязкость, диэлектрическую постоянную, скорость распространения звука, плотность, диффузию). Расположение соответствующих методов внутри этой газо-параметрической группы приводится в табл. 1, причем электронно-спектроскопический метод является промежуточным между I и II группами. Ситуации I и II групп и методы, им соответствующие, имеют общий признак: все процессы происходят в одной, газовой фазе, и потому могут быть объединены в один класс — однофазные методы. Теоретической основой их изучения и исследования являются ядерная физика, квантовая механика и молекулярно-кинетическая теория.

Дальнейшее усложнение физической ситуации состоит в том, что происходят процессы объединения молекул воды в устойчивые ассоциации или распада ассоциаций, т. е. процессы фазовых переходов, сопровождающиеся особенно сильно выраженными тепловыми явлениями. Методы, образующие эту группу, перечислены в таблице; эта группа образует один класс. Теоретической основой их является термодинамика, и в силу этого они могут быть названы термодинамическими и относятся к классу двухфазных однокомпонентных методов. Промежуточным между II и III группами является диффузионный метод, поскольку при конденсации процессы диффузии играют решающую роль.

Если в среду, где имеются молекулы воды, поместить второй компонент, который в воде не растворяется и не образует с ней химических соединений, то в зависимости от его свойств происходит

| Класс      | Группа | Физическая ситуация                                                                                           | Метод измерения влажности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Однофазные | I      | Отдельные молекулы проявляют свойства, не зависящие от совокупности их (молекулярно-параметрические)          | 1. Масс-спектрометрический<br>2. Ядерного магнитного резонанса<br>3. Электроно-спектрометрический [11]                                                                                                                                                                                                                                           |
|            | II     | Молекулы воды в совокупности с другими молекулами определяют свойства парогазовой смеси (газопараметрические) | 1. Радиоспектрометрический<br>2. Когерентного излучения [12]<br>3. Оптические:<br>ультрафиолетового поглощения<br>инфракрасного поглощения<br>4. Оптико-акустический<br>5. Диэлькометрический<br>6. Рефрактометрический<br>7. Термокондуктометрический<br>8. Акустический<br>9. Денситометрический<br>10. Вискозиметрический<br>11. Диффузионный |

| Класс                               | Группа | Физическая ситуация                                                                                                                                                            | Метод измерения влажности                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Двухфазные<br>однокомпо-<br>нентные | III    | Молекулы воды объединяются в устойчивые ассоциации или происходит распад этих ассоциаций (изменение агрегатного состояния) с изменением внутренней энергии (термодинамические) | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сгустительный</li> <li>2. Конденсационные: адиабатический компрессионный точки росы</li> <li>3. Испарительный</li> </ol>                                                                                                                                        |
| Многокомпо-<br>нентные              | IV     | Взаимодействие молекул паров воды с ассоциациями молекул неводного компонента с проявлением вандерваальсовых сил (сорбционно-равновесные)                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Капиллярно-конденсационный</li> <li>2. Сорбционно-термический</li> <li>3. Сорбционно-резистивный</li> <li>4. Сорбционно-диэлькометрический</li> <li>5. Сорбционно-массовый</li> <li>6. Сорбционно-вискозиметрический</li> <li>7. Сорбционно-цветовой</li> </ol> |
|                                     | V      | Взаимодействие молекул паров воды с ассоциациями молекул неводного компонента с образованием гидратов (сорбционно-сольватные)                                                  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Резистивно-электролитический</li> <li>2. Термоэлектролитический</li> <li>3. Конденсационно-психрометрический</li> </ol>                                                                                                                                         |
|                                     | VI     | Взаимодействие молекул паров воды с ассоциациями молекул неводного компонента с проявлением валентных сил (хемосорбционные)                                                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Хемосорбционно-термический</li> <li>2. Хемосорбционно-массовый</li> <li>3. Кулонометрический</li> <li>4. Титровальный</li> <li>5. Газометрический</li> </ol>                                                                                                    |

скопление молекул воды на поверхности компонента (адсорбция) и даже проникание их в глубь массы компонента (абсорбция). Это сопровождается изменением ряда физических свойств и величин компонента, измеренные значения которых могут служить мерой влажности газа. Так как при сорбции идет процесс, сходный с фазовым переходом, который сопровождается тепловыми процессами, например нагреванием компонента при поглощении паров воды, то это свойство положено в основу сорбционно-термического метода измерения влажности. Если поверхность пористая и поры представляют собой капилляры, то с образованием пленки воды начинает действовать механизм капиллярной конденсации вследствие проявления влияния кривизны поверхности жидкости. Когда такое тело обладает подходящей жесткостью и упругостью, конечный эффект выразится в изменении его линейных размеров, что и используется в широко распространенных деформационных гигрометрах — волосных, пленочных. Из рассмотренного видно, что сорбционно-термический и капиллярно-конденсационный методы занимают промежуточное положение между III и IV группами. Из приведенных в таблице методов этой группы следует отметить сорбционно-резистивный, на котором основано действие перспективных датчиков влажности — гигристоров.

Группу V образуют методы, соответствующие более сложной, чем предыдущая, физической ситуации: компонент, на котором происходит сорбция, растворяется в воде, образуя сольваты на своей поверхности. Поскольку в соответствии с законом Рауля упругость насыщения паров растворителя над поверхностью раствора меньше, чем над поверхностью чистого растворителя, вслед за адсорбцией происходит переход молекул воды в раствор, что, естественно, сопровождается выделением теплоты. На использовании этого эффекта основан конденсационно-психрометрический метод измерения влажности, который, очевидно, является промежуточным между IV и V группами.

Осуществляя подогрев образующегося насыщенного раствора до температуры, при которой упругость насыщения водяных паров над ним будет равна упругости паров анализируемой газовой смеси и, следовательно, создавая условия динамического равновесия, можно прийти к термоэлектрическому методу измерения влажности, на котором основаны электрические подогревные датчики «точки росы».

Поскольку, как и в случае методов IV группы, прохождение процессов, обусловленных соответствующими физическими ситуациями, определяется не только упругостью водяного пара, но и температурой газа, электрическое сопротивление как гигристора, так и электролитического влажочувствительного элемента зависит в конечном счете от относительной влажности газа. На этом эффекте основан резистивно-электролитический метод.

Наконец, если сорбированные молекулы воды вступают в химическую реакцию с адсорбентом, т. е. происходит хемосорбция с образованием нового химического соединения, то это представ-

ляет собой новую, более сложную физическую ситуацию. Особенностью этой ситуации является проявление валентных сил, которым соответствует энергия взаимодействия, намного большая, чем энергия взаимодействия вандерваальсовых сил, проявляющихся в IV и V группах. По этой причине десорбция отсутствует, процесс идет только в одну сторону — сорбции, и методы этой группы являются интегральными, а не равновесными. Поскольку десорбция отсутствует, то для регенерации свойств сорбента необходимо затратить энергию. При весовом методе осуществляется прокаливание, например, фосфорного ангидрида, или производится электролиз (в случае кулонометрического метода).

Промежуточным между V и VI группами является хемосорбционно-термический метод, в котором измеряется теплота хемосорбции. Общий признак всех физических ситуаций IV, V и VI групп — обязательное наличие сорбционно активного компонента, без которого невозможно осуществление рассмотренных процессов. Благодаря этому названные группы образуют класс многокомпонентных методов.

Таким образом, последовательно мысленно усложняя физическую ситуацию, мы построили модели различных возможных методов измерения влажности газов, естественным образом взаимосвязанных и образующих закономерную последовательность. Каждая модель имеет реальный аналог, и, следовательно, существующие методы измерения влажности оказываются приведенными в систему, соответствующую построенной.

Построенная модель естественной классификации методов влажности содержит шесть последовательно усложняемых физических ситуаций, которым, по существу, соответствует шесть основных принципов измерения влажности. Эти принципы могут быть объединены в три класса, для описания которых привлекаются преимущественно ядерная физика, квантовая механика и молекулярно-кинетическая теория для первого класса, термодинамика для второго и физическая химия для третьего.

Конечно, эта модель, представляющая собой первую попытку естественной классификации методов измерения влажности, по-видимому, не может быть свободной от недостатков, но, помимо методологической стороны, она имеет практическую: можно ожидать, что она облегчит ориентировку в методах измерения, анализ и оценку их, а также изучение этой обширной и важной, в первую очередь для метеорологии, области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pande A., Pande C. Physical Methods of Moisture Measurement. Instrument Practice, 1962, vol. 16, No. 7, N 8.
2. Усольцев В. А. Измерение влажности воздуха. Гидрометеониздат, Л., 1959.
3. Спенсер-Грегори Г. и Роурке Е. Гигрометрия. Металлургияиздат, М., 1963.

4. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. «Энергия», М.—Л., 1965.
5. Оршанский Д. Влажности газов измерение. Энциклопедия: «Автоматизация производства и промышленная электроника», М.—Л., 1965.
6. Щукин А. И., Михайленко В. И., Мотузова А. А. Классификация и анализ методов измерения влажности газообразных сред для разработки датчиков ГСП. ОНТИ, М., 1966.
7. Klaus Götte. Feuchtemeßtechnik Veb Verlag Technik, Berlin, 1967.
8. Humidity and Moisture, vol. 1—4, ed.-in-chief A. Wexler, N.—Y., Reinhold, 1965.
9. Sountag Dietrich. Hygrometrie. Ein Handbuch der Feuchtigkeitsmessung in Luft und anderen Gasen. I—VI Zief., Akademie—verlag, Berlin, 1966—1968.
10. Кедров Б. Классификация. Философская энциклопедия, Изд. «Советская энциклопедия», М., 1962.
11. Электронный спектрометр (раздел «Новые приборы») «Приборы для научных исследований», № 5, 1970.
12. E. Brannen, M. Haeksema, W. J. Sarjeant. Linearly polarized monochromatic radiation from a water—vapor laser of 118.6 microns, Canadian J. Physics, vol. 47, March 15, 1969, No. 6.

## ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПИРГЕЛИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Компенсационные пиргелиометры, как правило, используются для измерения прямой солнечной радиации только как образцовые приборы при поверке пиргелиометров и образцовых актинометров. Постоянная пиргелиометра определяется из сравнения его показаний с показаниями образцового (эталонного) прибора. Сравнительные отсчеты обычно производятся сериями по 10 отсчетов каждая (компенсационный ток пропускается поочередно через правую и левую полосы). Постоянная компенсационного пиргелиометра  $K$  определяется как среднее значение, вычисленное по всем 10 отсчетам, по формуле

$$K = \frac{S}{i^2}, \quad (1)$$

где  $S$  — интенсивность прямой солнечной радиации по образцовому прибору,  $i$  — сила тока в момент компенсации.

Значения постоянной  $K$ , полученные по разным сериям, различаются между собой в результате случайных погрешностей измерения, а также тех систематических погрешностей, которые меняются с изменением условий измерений.

К систематическим погрешностям, определяемым условиями измерений, следует отнести температурные погрешности, а также погрешности, связанные с изменением влияния околосолнечной радиации при изменении прозрачности атмосферы на приборы с разными апертурными углами.

Случайными являются погрешности отсчета миллиамперметра и нулевого гальванометра (или неполная компенсация), погрешности из-за несинхронности отсчетов поверяемого и образцового приборов, а также погрешности, вызванные влиянием ветра на показания пиргелиометра. Все эти погрешности в значительной мере зависят от квалификации поверителя, а погрешности, вызванные несинхронностью отсчетов и влиянием ветра — кроме того, и от условий сравнений. Случайная погрешность одного измерения прямой радиации может быть оценена по среднему квадратическому отклонению при определении постоянной пиргелиометра. Для оценки случайных погрешностей нами были использованы материалы по поверке пиргелиометров ГГО и УГМС за период 1966—1970 гг. Ввиду того что серия сравнений продолжается всего 10—15 мин., можно полагать, что условия сравнения в течение одной серии отсчетов остаются неизменными и систематические погрешности имеют

**Средние квадратические отклонения одного измерения**

| Номер прибора | Номер пиргелиометра |             | 1966 г.  |     |      |                 | 1967 г.  |     |      |                 |
|---------------|---------------------|-------------|----------|-----|------|-----------------|----------|-----|------|-----------------|
|               | поверяемого         | образцового | $\sigma$ | $n$ | $mT$ | место сравнений | $\sigma$ | $n$ | $mT$ | место сравнений |
| 1             | 250                 | 212         | 0,5      | 20  | 4—5  | Ленинград       | 0,4      | 6   | 4    | Воейково        |
| 2             | 196                 | 212         |          |     |      | "               | 0,7      | 30  | 6—9  | Одесса          |
| 3             | 541к                | 250, 212    | 0,3      | 9   | 4    | Карадаг         | 0,4      | 11  | 4—5  | Воейково        |
|               | 541к                | 212         |          |     |      | "               | 0,8      | 18  | 6—9  | Одесса          |
| 4             | 541ср               | 250, 212    | 0,2      | 3   | 4—5  | "               | 0,5      | 15  | 6—9  | "               |
| 5             | 616                 | 250         |          |     |      | "               |          |     |      |                 |
| 6             | 126                 | 250, 196    | 0,4      | 10  | 4    | "               |          |     |      |                 |
| 7             | 258                 | 250, 196    | 0,9      | 8   | 4    | "               |          |     |      |                 |
| 8             | 191                 | 250, 196    | 0,8      | 8   | 4    | "               |          |     |      |                 |
| 9             | 213                 | 196         |          |     |      |                 |          |     |      |                 |
| 10            | 539                 | 196         |          |     |      |                 |          |     |      |                 |
| 11            | 519                 | 196         |          |     |      |                 |          |     |      |                 |
| 12            | 116                 | 196         |          |     |      |                 |          |     |      |                 |
| 13            | 538                 | 250         | 0,4      | 19  | 4    | "               |          |     |      |                 |

постоянное значение. В этом случае рассеяние значений  $K$  в серии обуславливается только случайными погрешностями, которые можно оценить средним квадратическим отклонением значений  $K$ , полученных по одному измерению, от среднего за серию. Под одним измерением подразумевается среднее из значений двух отсчетов, полученных при пропускании тока через правую и левую полосы. Среднее квадратическое отклонение вычислялось отдельно для каждого пиргелиометра по годам (по всем сериям) по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (K - \bar{K})^2}{n(m-1)}}, \quad (2)$$

где  $K$  — значение постоянной, вычисленное по одному измерению,  $\bar{K}$  — значение постоянной, вычисленное как среднее за серию,  $m$  — число измерений в серии (в данном случае  $m=5$ ),  $n$  — число серий сравнений за данный год.

В табл. 1 приведены значения  $\sigma$ , вычисленные для 13 приборов за отдельные годы, а также число серий сравнений, место сравнений и значения произведений оптической массы на фактор мутности ( $mT$ ), при которых проводились сравнения.

Приборы № 250, 196, 126, 258, 213 представляют собой оригинальные пиргелиометры Онгстрема, у прибора № 116 после ремонта приемные полосы заменены на более толстые; приборы № 519, 538 и 539 — пиргелиометры Янишевского с круглым отверстием [1], пиргелиометры № 541 и 616 — модернизированные [2, 3].

Приборы № 1—5 проверялись сотрудниками ГГО, имеющими большой практический опыт по работе с пиргелиометрами. При проверке приборов № 6—13 измерения по образцовому прибору вели сотрудники ГГО, а по поверяемым приборам — представители УГМС, которые не все имели достаточный опыт работы с пиргелиометрами.

Таблица 1

пиргелиометром  $\sigma$  в процентах от величины радиации

| 1968 г.  |     |      |                 | 1969 г.  |     |      |                 | 1970 г.  |     |      |                 |
|----------|-----|------|-----------------|----------|-----|------|-----------------|----------|-----|------|-----------------|
| $\sigma$ | $n$ | $mT$ | место сравнений | $\sigma$ | $n$ | $mT$ | место сравнений | $\sigma$ | $n$ | $mT$ | место сравнений |
| 0,4      | 11  | 4    | Воейково        | 0,4      | 19  | 4—5  | Воейково        | 0,4      | 10  | 4    | Воейково        |
| 0,3      | 7   | 3—4  |                 | 0,3      | 12  | 4—5  |                 | 0,4      | 17  | 3—4  |                 |
| 0,2      | 26  | 3—5  | Карадаг         | 0,2      | 18  | 4—5  | Карадаг         | 0,3      | 12  | 3—4  | "               |
| 0,2      | 13  | 3—5  | "               | 0,3      | 15  | 4—5  | "               | 0,4      | 7   | 3—5  | "               |
|          |     |      |                 | 0,3      | 22  | 4—5  | "               |          |     |      |                 |
|          |     |      |                 | 0,8      | 35  | 6—10 | "               |          |     |      |                 |
|          |     |      |                 | 1,3      | 49  | 4—10 | "               |          |     |      |                 |
|          |     |      |                 | 0,6      | 29  | 4—7  | "               |          |     |      |                 |
| 0,6      | 25  | 4—5  | "               | 0,8      | 7   | 6—7  | "               |          |     |      |                 |
| 0,7      | 22  | 4—5  | "               | 1,0      | 27  | 5—10 | "               |          |     |      |                 |

Из таблицы видно, что для каждого пиргелиометра при удовлетворительных условиях прозрачности атмосферы значение  $\sigma$  мало меняется от года к году и является характерным для данного прибора и квалификации наблюдателя. При квалифицированном наблюдателе и условиях мутности, характеризующихся  $mT=3\div 5$ , в большинстве случаев  $\sigma=0,3\%$  и не превышает  $0,5\%$ . В случаях большей мутности атмосферы ( $mT=6\div 9$  в Одессе) и при меньшей квалификации наблюдателей значения  $\sigma$  увеличиваются до  $0,8-1,3\%$ . Принимая максимальную погрешность одного измерения равной  $3\sigma$ , получим для хороших условий наблюдения  $3\sigma=0,9\%$ .

Случайные погрешности определения  $K$  обусловлены погрешностями как поверяемого, так и образцового прибора. Пиргелиометры № 196 и 250 — вторичные эталоны ГГО того же качества, что и эталон № 212, и оснащены идентичным измерительным оборудованием. Их случайные погрешности могут быть приняты равными погрешностям эталона и, следовательно, средняя квадратическая погрешность одного измерения пиргелиометром прямой солнечной

радиации  $\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \cong 0,2\%$ , а максимальная погрешность  $3\sigma=0,6\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Янишевский Ю. Д. Компенсационный пиргелиометр и его улучшение. Актинометрия и атмосферная оптика. Труды 2-го Межведомственного совещания по актинометрии и оптике. Гидрометеониздат, Л., 1961.
2. Клеванцова В. А., Покровская И. А., Янишевский Ю. Д. Исследование модернизированных пиргелиометров Онгстрема. Тр. ГГО, вып. 240, 1969.
3. Клеванцова В. А., Покровская И. А. Исследование новых моделей пиргелиометров. Труды ГГО, вып. 260, 1971.

## О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДКОВ ОСАДКОМЕРАМИ ГЕЛЬМАНА

С 1967 г. на экспериментальных базах по усовершенствованию методики измерения осадков в Нижнедевицке, Омске, Оле и на осадкомерном полигоне ВНИГЛ сравниваются показания стандартных осадкомеров Польской Народной Республики, Германской Демократической Республики и Венгерской Народной Республики с эталонными приборами. Эти сравнения делаются для определения величин погрешности, вызываемой искажением поля скорости ветра при обтекании им осадкомера (ветровой погрешности). С 1968 г. на этих же базах исследуются потери жидких осадков, собранных перечисленными выше осадкомерами, на испарение их между сроками измерений. В период 1967—1970 гг. в ГГО, Куйбышевской ГМО и в ГДР [8—10] были определены потери собранных жидких осадков на смачивание внутренней поверхности этих осадкомеров. В настоящей работе рассматриваются материалы сравнений за период 1967—1970 гг.

Методика оценки погрешностей применялась та же, что и для осадкомера Третьякова в 1961—1965 гг. [1, 2, 7, 8], с незначительными изменениями, касающимися ветровой погрешности осадков и потерь на испарение жидких осадков. (Об этих изменениях будет сказано ниже, в соответствующих разделах статьи.)

Все три осадкомера представляют собой различные модификации известного осадкомера Гельмана с приемной площадью 200 см<sup>2</sup>. Они сделаны из различного материала, по-разному окрашены, имеют различные диаметры отверстий для стока осадков из воронки в кружку и различную конфигурацию колец вокруг приемного отверстия.

Ниже представлены предварительные результаты определения погрешностей для польского, германского и венгерского осадкомеров.

### Жидкие осадки

Потери на смачивание. Для польского осадкомера потери на смачивание определялись трижды: в 1967 г. независимо друг от друга И. Н. Нечаевым и автором статьи и в 1970 г. И. Н. Нечаевым. В 1967 г. оба эксперимента дали одинаковые результаты, которые показали, что для этого осадкомера величина

потерь на смачивание сильно зависит от количества собранных осадков и меняется от 0,1 до 0,4 мм. Эксперимент 1970 г. подтвердил пределы изменения потерь на смачивание, но зависимость величин этих потерь от суммы собранных осадков получилась иной. Результаты экспериментов 1967 и 1970 гг. следующие:

1967 г.

|                                            |         |         |         |      |
|--------------------------------------------|---------|---------|---------|------|
| Количество собранных осадков, мм . . . . . | 0,0—0,5 | 0,6—1,5 | 1,6—3,5 | >3,5 |
| Потери на смачивание, мм . . . . .         | 0,1     | 0,2     | 0,3     | 0,4  |

1970 г.

|                                            |         |         |          |     |
|--------------------------------------------|---------|---------|----------|-----|
| Количество собранных осадков, мм . . . . . | 0,0—2,0 | 2,1—4,0 | 4,0—10,0 | >10 |
| Потери на смачивание, мм . . . . .         | 0,1     | 0,2     | 0,3      | 0,4 |

Объяснить такое изменение величин потерь на смачивание можно, очевидно, только тем, что в 1967 г. эксперимент проводился на новых, покрытых свежей краской осадкомерах, а в 1970 г. на приборах, простоявших на метеорологической площадке четыре года.

Для германского осадкомера очень тщательное и подробное исследование потерь на смачивание было сделано Карбаумом [10]. Им была получена величина потери 0,25 мм. Независимо от результатов Карбаума автором для этого же прибора в 1967 г. была получена величина 0,26 мм. Окончательно величина потери на смачивание была принята равной 0,25 мм. При обработке материалов сравнений она вводилась в показания прибора при каждом измерении осадков (с последующим округлением до десятих долей миллиметра). При подсчетах месячных сумм величина 0,25 умножалась на число измерений  $n$  и прибавлялась к измеренной месячной сумме (также с последующим округлением).

Для венгерского осадкомера потери на смачивание оказались равными 0,2 мм при каждом измерении. Эта величина была получена в 1968 г. независимо друг от друга Л. В. Дубровиным (Куйбышевская ГМО) и И. Н. Нечаевым (ГГО).

Потери на испарение. Методика определения этой погрешности использовалась почти та же, что и при определении Нечаевым испарения из осадкомера Третьякова [7]. Разница заключалась лишь в том, что, по предложению Карбаума, вода, имитирующая осадки, наливалась прямо в водосборный сосуд без предварительного смачивания ею внутренней поверхности приемной воронки. Таким образом, при расчете интенсивности испарения  $W$  мм/час приходилось учитывать только потери на смачивание водосборного сосуда, которые для всех трех приборов равны 0,1 мм. Такой способ наливания экспонируемой воды позволил уменьшить разброс полученных значений  $W$  за счет разброса отдельных значений потерь на смачивание.

На рис. 1 представлен график зависимости  $\bar{W}$  от среднего дефицита влажности воздуха  $\bar{d}$  между сроками измерений осадков на высоте 2 м. (Ограниченное количество материалов наблюдений не позволило получить зависимость  $\bar{W}$  не только от  $\bar{d}$ , но и от средней между сроками измерений скорости ветра на высоте 2 м, как это сделано И. Н. Нечаевым для осадкомера Третьякова [7].) На этом же графике кривая 4 характеризует интенсивность испарения из осадкомера Третьякова при средней скорости ветра от 0 до 2 м/сек. Хотя полученные результаты еще не являются окончательными, можно с уверенностью сказать, что испарение из всех трех осадкомеров Гельмана значительно меньше, чем из осадкомера Третьякова. Только у венгерского осадкомера кривая  $\bar{W}$  при  $\bar{d} < 5$  мм про-

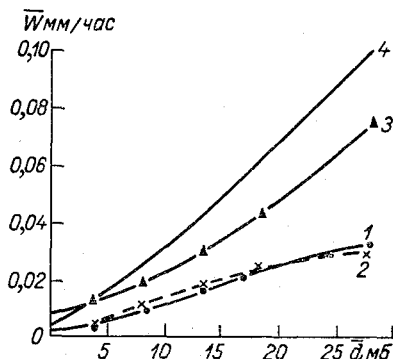


Рис. 1. Интенсивность испарения осадков  $\bar{W}$  из осадкомеров Гельмана в зависимости от дефицита влажности воздуха  $\bar{d}$  между сроками их измерений.

1 — польского, 2 — германского, 3 — венгерского, 4 — осадкомера Третьякова (при скорости ветра на уровне осадкомера 0—2 м/сек.).

ходит несколько выше, чем кривая для осадкомера Третьякова при скорости ветра на высоте 2 м ( $u_2$ ), равной 0—2 м/сек. Такое незначительное испарение из осадкомеров Гельмана связано, очевидно, с некоторыми преимуществами их конструкции — небольшим сливным отверстием и впаянным дном воронки (тогда как у осадкомера Третьякова воронка вкладывается). Наибольшая по сравнению с другими осадкомерами величина  $\bar{W}$  у венгерского осадкомера объясняется, по-видимому, тем, что прибор не окрашен, металл, из которого он сделан, сильно нагревается на солнце, а сливное отверстие у него больше, чем у двух других.

**Ветровая погрешность.** Способ определения ветровой погрешности для осадкомера Третьякова подробно изложен в работе Э. Г. Богдановой [1]. Этим же способом определялась ветровая погрешность для осадкомеров Гельмана. В качестве эталонного прибора использовался установленный в яме дождемер О-1М, который представляет собой ведро осадкомера Третьякова со вставленной в него латунной воронкой и стеклянной бутылкой для сбора осадков. Дождемер О-1М был тщательно обследован [5, 6]. Его потери на смачивание равны 0,1 мм при каждом измерении осадков, а потери на испарение практически отсутствуют. Способ установки наземного осадкомера в яме диаметром 120—150 см неоднократно описан, и доказано, что при такой установке приборов забрызгивание отсутствует [4].

Все три осадкомера Гельмана были установлены на высоте 2 м. Осадки измеряли два раза в сутки, около 8 и 20 час. московского времени. Для большей точности определения количества собранных осадков при измерениях приборы заменяли другими, а не переливали собранные осадки из водосборной кружки в измерительный стакан прямо на площадке. Такой способ измерений позволил одновременно точнее учесть потери на смачивание.

Во время дождя определялась средняя скорость ветра на уровне установки осадкомеров. Параметр структуры жидких осадков  $N\%$  рассчитывался по записям плувиографа, имеющегося в каждом пункте сравнений. (Подробное описание параметра  $N$ , представляющего собой отношение количества осадков, выпавших с интенсивностью 0,03 мм/мин. и меньше, к общей сумме осадков, дано в работе Богдановой [1].)

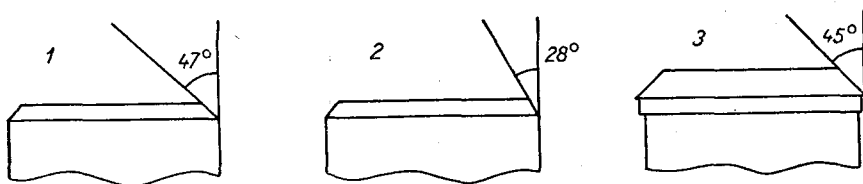


Рис. 2. Схемы приемных колец польского (1), германского (2) и венгерского (3) осадкомеров.

Вначале предполагалось, что у всех трех приборов ветровая погрешность будет, примерно, одинакова, так как все они представляют собой модификации осадкомера Гельмана, и результаты наблюдений можно будет объединить. Но предварительный анализ полученных материалов, сделанный так же, как в работе [4], показал, что они собирают разное количество осадков. Это можно объяснить, по-видимому, различной конфигурацией их приемных колец и отсутствием ветровой защиты. На основании результатов работы [5] можно предположить, что влияние конфигураций приемных колец сказывалось бы на величине ветровой погрешности значительно слабее (или совсем отсутствовало), если бы эти приборы устанавливались в ветровой защите. На рис. 2 показаны схемы приемных отверстий польского, германского и венгерского осадкомеров, а в табл. 1 представлены суммы осадков, собранные ими и наземным осадкомером в различных пунктах сравнений.

Обработка полученных данных состояла в следующем. Для каждой полусутки в показания всех осадкомеров вводились поправки на смачивание<sup>1</sup>, определялась средняя скорость ветра во время дождя  $u_2$  и полусуточное значение  $N$ . Затем все имеющиеся материалы сортировались по градациям  $N$  через 10% (т. е. по  $N$  от 0 до 10, от 11 до 20% и т. д.). Для каждой градации подсчиты-

<sup>1</sup> Поправки на испарение не вводились, так как для осадкомеров Гельмана (см. рис. 1) и дождемера О-1М [6] они практически не играют роли.

Таблица 1

Количество жидких осадков, собранных осадкомерами наземным и Гельмана

| Пункт             | Годы      | Число измерений | Суммы осадков, собранных осадкомерами, мм |          |            |            |
|-------------------|-----------|-----------------|-------------------------------------------|----------|------------|------------|
|                   |           |                 | наземным                                  | польским | германским | венгерским |
| Нижнедевицк       | 1967—1970 | 199             | 873,7                                     | 874,8    | —          | —          |
|                   |           | 199             | 873,7                                     | —        | 801,5      | —          |
|                   |           | 167             | 695,6                                     | —        | —          | 632,8      |
| Омск              | 1967—1970 | 96              | 543,5                                     | 543,8    | —          | —          |
|                   |           | 96              | 543,5                                     | —        | 499,0      | —          |
|                   |           | 75              | 388,5                                     | —        | —          | 347,6      |
| Валдай<br>(ВНИГЛ) | 1967—1969 | 129             | 756,9                                     | 716,6    | —          | —          |
|                   |           | 129             | 756,9                                     | —        | 694,7      | —          |
|                   |           | 44              | 258,4                                     | —        | —          | 232,0      |
| Сумма             | —         | 424             | 2174,1                                    | 2135,2   | —          | —          |
|                   |           | 424             | 2174,1                                    | —        | 1995,2     | —          |
|                   |           | 286             | 1342,5                                    | —        | —          | 1212,6     |

валась величина  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$ , где  $\bar{u}_2$  — средняя, взвешенная по суммам осадков скорость ветра во время дождя, а  $\delta \bar{V}$  — относительная погрешность сравниваемого прибора,

$$\delta \bar{V} = \frac{\sum (x_n + q_n) - \sum (x' + q')}{\sum (x' + q')} \quad (1)$$

Здесь  $(x_n + q_n)$  — исправленная на смачивание полусуточная сумма осадков, собранная наземным дождемером,  $(x' + q')$  — то же самое для сравниваемого осадкомера Гельмана.

Величина  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$  была рассчитана для каждого осадкомера Гельмана (предварительно было установлено, что  $(\delta V/\bar{u}_2) \approx \delta \bar{V}/\bar{u}_2$ ).

Такой способ определения ветровой погрешности почти ничем не отличается от способа, предложенного Богдановой для осадкомера Третьякова [1]. Отличие состоит лишь в том, что Богданова пользовалась не полусуточными, а средними месячными значениями входных параметров и получала  $(\delta V/\bar{u}_2)_{\text{мес}}$ .

Следует отметить, что перед тем, как определять зависимость  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$  от  $N$ , по материалам германского осадкомера было установлено, что зависимость  $\delta V$  от  $u_2$  (при  $u_2 = 0 \div 6$  м/сек.) близка к линейной.

Польский осадкомер с самого начала сравнений привлек к себе внимание тем, что в определенных случаях собирал большее количество осадков, чем наземный (без учета поправки на смачивание,

которая у него значительно больше, чем у дождемера О-1М). Это отмечалось в течение трех лет сравнений и во всех пунктах, причем только для жидких осадков. При внимательном изучении конфигурации прибора было обнаружено, что у этого осадкомера угол наклона приемного кольца равен  $47^\circ$  (рис. 2) и, очевидно, при крупнокапельных (ливневых) дождях происходит забрызгивание осадков от края приемного кольца внутрь прибора.

Для проверки этого предположения летом 1970 г. в двух пунктах (Нижедевицке и Омске) польские осадкомеры были установлены в яме так же, как наземный дождемер О-1М. Данные этих наблюдений были обработаны описанным выше способом, т. е. определялись величины  $\delta \bar{V}$  и  $\bar{N}$ , но без учета поправок на смачивание. Зависимость  $\delta \bar{V}$  от  $\bar{N}$  для ямочного польского осадкомера

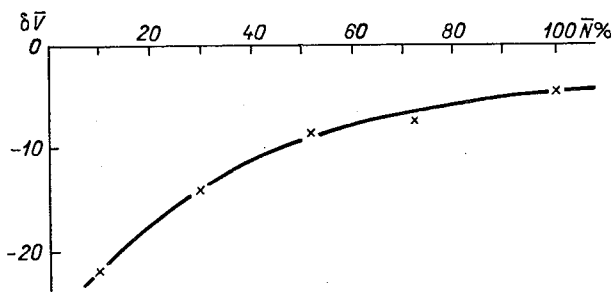


Рис. 3. Зависимость от  $\bar{N}$  относительной разности  $\delta \bar{V}$  показаний наземных польского осадкомера и дождемера О-1М.

представлена на рис. 3. Из него следует, что при любых  $N$  ямочный польский осадкомер собирает большее количество осадков, чем наземный дождемер О-1М, и разница в их показаниях уменьшается с увеличением  $N$ , т. е. при переходе от крупнокапельных (ливневых) дождей к мелкокапельным (обложным). Так как влияние аэродинамических факторов при наземной установке практически отсутствует, пока никаких иных предположений, кроме забрызгивания, для объяснения этого явления нет. (Такое предположение подтверждается еще и тем, что описанный эффект отсутствует при измерении твердых осадков.)

Если еще учесть, что поправка на смачивание у польского осадкомера больше, чем у осадкомера О-1М, и возрастает с увеличением суммы собранных осадков, то забрызгивание можно считать четвертым видом погрешности, свойственной польскому осадкомеру. Таким образом, на результатах сравнительных наблюдений сказалось одновременное действие двух погрешностей: ветровой и забрызгивания.

На рис. 4 а представлена зависимость  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$  от  $\bar{N}$  для польского осадкомера, установленного на высоте 2 м. Кривая на рис. 4 а характеризует совместное действие обеих указанных погрешностей

при скорости ветра  $u_2 = 1$  м/сек. и изменении  $\bar{N}$  от 0 до 100% (без учета потерь на смачивание). При  $\bar{N}$ , равном 15—40%, забрызгивание преобладает над ветровой погрешностью и  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  принимает отрицательные значения; при дальнейшем увеличении  $N$  преобладает ветровая погрешность и кривая идет вверх, достигая 4% при  $N = 100\%$ . Увеличение значений  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  при изменении  $N$  от 0 до 15% не согласуется с графиком на рис. 3 (для наземных осадкомеров), но, как будет показано ниже, для двух других осадкомеров Гельмана в этом же интервале значений  $N$  наблюдается аналогичное явление, причины которого пока неизвестны.

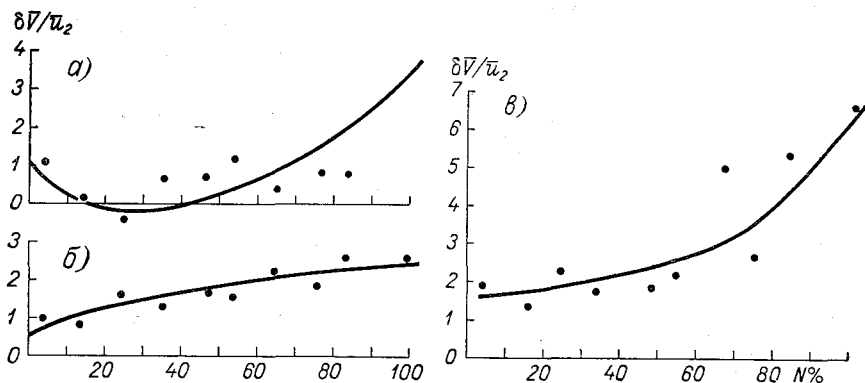


Рис. 4. Зависимость  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  от  $N$  для осадкомеров Гельмана.

а — польского, б — германского, в — венгерского.

Для германского осадкомера зависимость  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  от  $N$  (рис. 4 б) выражена плавной кривой, показывающей возрастание значений  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  от 0,5% при  $N=0$  до 2,5% при  $N=100\%$ . Следует отметить, что при обработке материала сравнительных наблюдений по германскому осадкомеру значения  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  вычислялись от года к году по нарастающим суммам и сколько-нибудь заметных отклонений  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  от значений, показанных на рис. 4 б, не наблюдалось. Поэтому можно предположить, что при дальнейшем накоплении материалов сравнений значительных изменений в расположении кривой не произойдет, и полученные результаты можно рассматривать как предварительную характеристику ветровой погрешности.

При скорости ветра  $u_2 \approx 2,5 \div 3$  м/сек. и  $N = 40 \div 60\%$  (т. е. при ливневых дождях) ветровая погрешность составляет 4—6% измеренной суммы осадков; при  $N \approx 100\%$  (т. е. при обложных дождях) эта погрешность составляет 7—8%.

При изменении  $N$  от 0 до 15% отмечается плавное увеличение  $\delta\bar{V}/\bar{u}_2$  от 0,5 до 1%, хотя, по физическим соображениям, кривая должна была бы уходить в начало координат.

Венгерский осадкомер был установлен в пунктах сравнений лишь в 1969 г., поэтому представленная на рис. 4 в кривая зависимости  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$  от  $\bar{N}$  является ориентировочной. Однако некоторые особенности ветровой погрешности этого осадкомера уже проявляются достаточно четко: вся кривая на рис. 4 в расположена выше, чем для германского осадкомера (рис. 4 б); характерно резкое увеличение ветровой погрешности при  $\bar{N}$ , равном 70% и больше, т. е. при мелкокапельных обложных осадках. Эти особенности можно объяснить существованием выступа у приемного кольца осадкомера (рис. 2), очевидно, ухудшающего аэродинамические свойства прибора. Естественно, что влияние этого выступа сильнее сказывается при мелкокапельных дождях. Так как угол наклона приемного кольца венгерского осадкомера составляет  $45^\circ$ , возможно, что у него тоже есть забрызгивание, хотя такого явного эффекта, как у польского прибора, не наблюдается.

Для кривых ветровой погрешности польского, германского и венгерского осадкомеров (рис. 4) характерна одна общая особенность (о которой уже упоминалось выше): они не уходят в начало координат, а при  $\bar{N} \approx 4 \div 5\%$  имеет место даже некоторое увеличение значений  $\delta \bar{V}/\bar{u}_2$ . Причины этого пока не выяснены.

Несмотря на то что все три сравниваемых прибора являются модификациями осадкомера Гельмана, величины их погрешностей (особенно, ветровой) различны и зависят от конструктивных особенностей каждого из них.

### Твердые осадки

Для твердых осадков определялась только ветровая погрешность. Исследование этой погрешности без учета потерь на испарение и смачивание не может привести к значительным ошибкам, так как она на порядок больше этих потерь [2].

При исследовании в СССР ветровой погрешности твердых осадков за эталон принимались показания осадкомера Третьякова, установленного на лесной поляне, а параметром структуры снега была выбрана средняя температура воздуха во время его выпадения [1]. Для получения достаточного количества материалов потребовались многолетние ряды параллельных наблюдений по нескольким десяткам пар осадкомеров, установленных на лесной поляне и на открытом месте. Практически осуществить такой способ получения экспериментальных данных для международных сравнений невозможно, поэтому был избран другой путь, предложенный еще в 1966 г. [9]: в пунктах сравнений на высоте 2 м устанавливались осадкомеры Гельмана и стандартный осадкомер Третьякова. По материалам наблюдений вычислялась относительная разность их показаний

$$\delta V'_s = \frac{\Delta V'_s}{x'} = \frac{x_T - x'}{x'}, \quad (2)$$

где  $x_T$  — сумма твердых осадков, собранная осадкомером Третьякова;  $x'$  — сумма осадков, собранная одним из сравниваемых осадкомеров Гельмана.

Так как ветровая погрешность осадкомера Третьякова известна [1], дальнейший переход от показаний осадкомеров Гельмана к эталонным измерениям осуществлялся по формуле

$$\delta V_s = \delta V'_s + \delta V_T + \delta V'_s \delta V_T, \quad (3)$$

где  $\delta V_s$  — ветровая погрешность осадкомеров Гельмана (%),  $\delta V_T$  — ветровая погрешность осадкомера Третьякова (%).

При обработке материалов сравнений все измеренные величины осадков (полусуточные суммы) сортировались по градациям температуры от 0 до —5 и ниже —6°. Смешанные осадки выделялись в специальную градацию вне зависимости от температуры, при которой они выпадали. Внутри каждой градации температуры измеренные суммы осадков еще раз сортировались по интервалам скорости ветра 0—2, 2,1—4 м/сек. и т. д. Затем для каждой градации температуры и скорости ветра рассчитывались средние взвешенные по суммам осадков значения  $\delta V'_s$  и  $\bar{u}_2$ . Для каждой градации температуры строился график зависимости  $\delta V'_s$  (т. е. относительной разности показаний осадкомера Третьякова и одного из осадкомеров Гельмана) от скорости ветра.

Имея значения  $\delta V'_s$  и пользуясь опубликованным в работе [1] аналогичным графиком зависимости для осадкомера Третьякова, можно вычислить значения  $\delta V_s$  при различной скорости ветра и получить график зависимости ветровой погрешности твердых осадков для каждого из сравниваемых осадкомеров Гельмана.

В табл. 2 приведены суммы осадков, измеренные осадкомерами Гельмана и Третьякова в различных пунктах сравнений, и предварительные результаты применения описанного способа для определения ветровой погрешности польского, германского и венгерского осадкомеров.

Наибольшее количество материалов сравнений было получено для польского осадкомера. Поэтому для него оказалось возможным построить графики зависимости  $\delta V'_s$  и  $\delta V_s$  от  $\bar{u}_2$  для трех температурных градаций. На рис. 5 даны кривые  $\delta V'_s$  (т. е. относительная разность показаний осадкомеров польского и Третьякова) и  $\delta V_s$  (т. е. погрешность для польского осадкомера по отношению к принятому ранее [1] в качестве эталона осадкомеру, установленному на лесной поляне).

Графики на рис. 5 показывают, что ветровая погрешность польского осадкомера очень велика. При температуре воздуха от 0 до —5° и  $\bar{u}_2 \approx 4 \div 6$  м/сек. он собирает осадков в половину меньше, чем осадкомер Третьякова и в 1,5 раза меньше, чем эталонный осадкомер. При этой же скорости ветра и температуре ниже —6° погрешность составляет 300%, а при скорости ветра около 7 м/сек.

## Количество твердых осадков, собранных осадкомерами Гельмана и Третьякова

| Пункт             | Годы      | Число измерений | Суммы осадков, собранных осадкомерами, мм |          |            |            |
|-------------------|-----------|-----------------|-------------------------------------------|----------|------------|------------|
|                   |           |                 | Третьякова                                | польским | германским | венгерским |
| Нижедевицк        | 1966—1970 | 213             | 425,0                                     | 284,4    | —          | —          |
|                   | 1967—1970 | 154             | 283,0                                     | —        | 174,2      | —          |
|                   | 1969—1970 | 81              | 134,7                                     | —        | —          | 77,6       |
| Омск              | 1966—1970 | 131             | 118,9                                     | 51,5     | —          | —          |
|                   | 1967—1970 | 92              | 92,0                                      | —        | 40,2       | —          |
|                   | 1969—1970 | 40              | 41,2                                      | —        | —          | 19,6       |
| Ола               | 1967—1970 | 152             | 170,4                                     | 86,8     | —          | —          |
| Валдай<br>(ВНИГЛ) | 1966—1970 | 368             | 459,9                                     | 284,6    | —          | —          |
|                   | 1967—1970 | 369             | 460,2                                     | —        | 283,6      | —          |
|                   | 1969—1970 | 120             | 146,2                                     | —        | —          | 91,8       |
| Сумма             |           | 864             | 1175,1                                    | 707,3    | —          | —          |
|                   |           | 615             | 835,2                                     | —        | 498,1      | —          |
|                   |           | 241             | 321,9                                     | —        | —          | 189,0      |

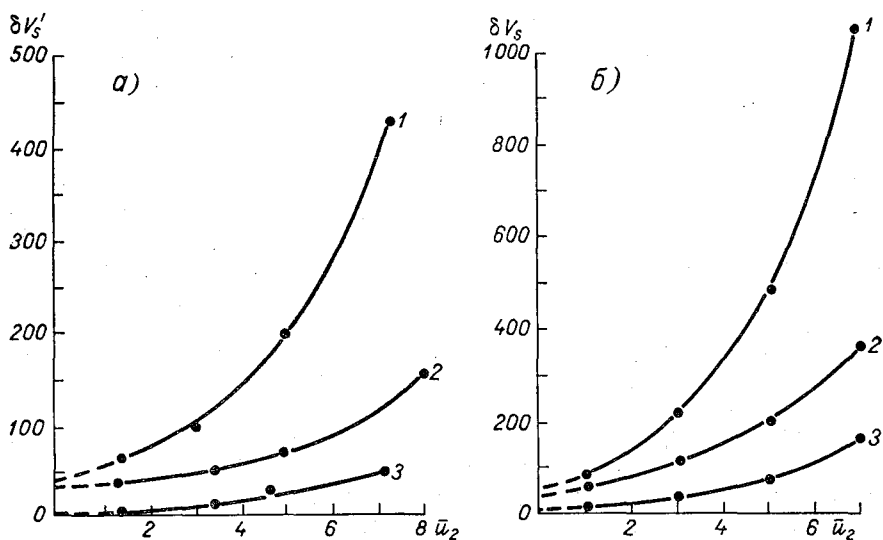


Рис. 5. Ветровая погрешность измерения твердых осадков польским осадкомером при различной скорости ветра и температуре воздуха во время их выпадения.

При значениях  $t$ : 1 — от 0 до  $-5^\circ$ , 2 — от  $-6$  до  $-20^\circ$ , 3 — смешанные осадки.

достигает 1000%, т. е. по сравнению с эталоном польский осадкомер собирает в 10 раз меньше осадков. Для смешанных осадков погрешность не превышает 150%. Такая большая разница в показаниях польского осадкомера и осадкомера Третьякова (соответственно и величина ветровой погрешности) объясняется, по-видимому, двумя основными причинами: отсутствием ветровой защиты у польского осадкомера и выдуванием из воронки уже попавших туда осадков.

Германский осадкомер был установлен годом позже польского и только в трех пунктах сравнений. По имеющемуся экспериментальному материалу оказалось возможным построить только график зависимости  $\delta V'_s$  от  $u_2$  для двух температурных градаций

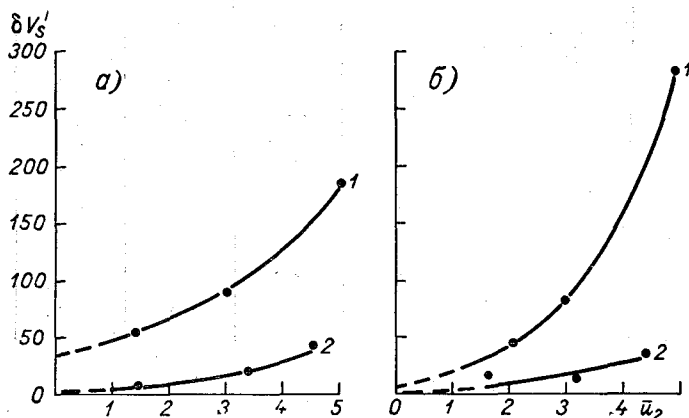


Рис. 6. Относительная разность  $\delta V'_s$  показаний осадкомеров.  
а — германского и осадкомера Третьякова, б — венгерского и осадкомера Третьякова. 1 — при значениях  $t$  от 0 до  $-20^\circ$ , 2 — смешанные осадки.

(рис. 6 а), причем кривая 1 объединяет температуру от 0 до  $-5$  и от  $-6$  до  $-20^\circ$ . Из сравнений рис. 6 а с рис. 5 можно сделать вывод о том, что отличия показаний обоих этих приборов от показаний осадкомера Третьякова (следовательно, и ветровая погрешность) примерно одинаковы. (В кривую 1 на рис. 6 а осадки, выпавшие при температуре от 0 до  $-5^\circ$ , входят со значительно большим весом, чем при температуре от  $-6$  до  $-20^\circ$ ). Это обстоятельство свидетельствует о незначительной роли крестовины. Очевидно, она не препятствует выдуванию собранного снега.

В 1967 г. В. С. Голубев и Р. Е. Рогоцкая [3] опубликовали кривую зависимости ветровой погрешности германского осадкомера от скорости ветра (без учета температуры), полученную по данным сравнительных наблюдений на осадкомерном полигоне ВНИГЛ (Валдай) в 1966 г. За эталон Голубев и Рогоцкая принимали показания осадкомера Третьякова, установленного в кустарниковой защите. (Описание этой защиты дано в работе [3].) Для сравнения результатов, полученных Голубевым и Рогоцкой и автором статьи,

на рис. 7 представлен график зависимости  $\delta V'_s$  и  $\delta V_s$  от  $\bar{u}_2$ , полученный для германского осадкомера только по данным ВНИГЛ за 1967—1969 гг. и без учета температурных градаций. Кривая  $\delta V'_s$  характеризует относительную разность показаний осадкомеров германского и Третьякова, кривая  $\delta V_s$  — ветровую погрешность германского осадкомера. На верхней кривой нанесены точки, полученные Голубевым и Рогоцкой и автором статьи; обе кривые практически совпадают. Такое совпадение подтверждает возможность получения количественной оценки ветровой погрешности для осадкомеров Гельмана способом, описанным в начале параграфа.

Кривые  $\delta V'_s$  для венгерского осадкомера даны на рис. 6 б. По этому осадкомеру собрано наименьшее количество материала (табл. 2), но полученные кривые свидетельствуют о том, что ветровая погрешность этого осадкомера также велика, а при низких температурах она, по-видимому, больше, чем у двух других осадкомеров Гельмана из-за упомянутого выступа приемного кольца (см. рис. 2).

Полученные данные свидетельствуют о существовании большой ветровой погрешности при измерении твердых осадков осадкомерами Гельмана. Эта погрешность превышает аналогичную погрешность осадкомера Третьякова в несколько раз. Объясняется это, очевидно, отсутствием ветровой защиты и выдуванием собранных осадков. Для территории ГДР и ВНР наиболее характерным видом зимних осадков являются смешанные или выпадающие при  $t \geq -5^\circ$  и  $\bar{u}_2 \approx 2 \div 3$  м/сек., так что средняя ветровая погрешность  $\delta V_s \approx 50 \div 100\%$ . При более низких температурах и при скорости ветра больше 5 м/сек. (например, в горных районах) эта погрешность может достигать 1000%. Влияние крестовины при таких размерах погрешности, очевидно, настолько незначительно, что его практически невозможно выявить.

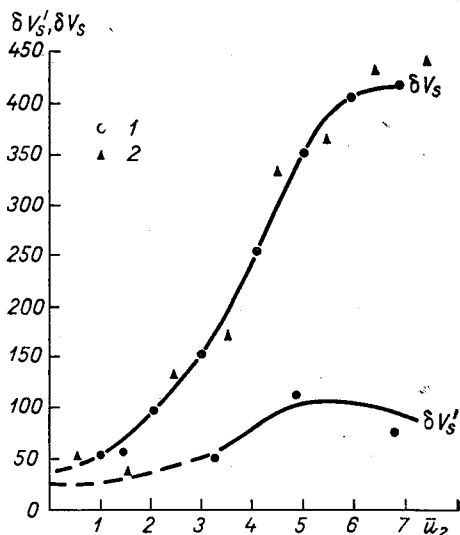


Рис. 7. Ветровая погрешность германского осадкомера, полученная по материалам сравнений на Валдае (ВНИГЛ). 1 — значения  $\delta V'_s$ , полученные по кривой  $\delta V'_s$ . 2 — значения  $\delta V_s$ , полученные В. С. Голубевым и Р. Е. Рогоцкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Э. Г. Исследование ветровой погрешности измерения осадков. Труды ГГО, вып. 195, 1966.

2. Брызгин Н. Н. и др. Потери осадков на смачивание осадкомерного ведра. Метеорология и гидрология, № 3, 1967.
3. Голубев В. С., Рогоцкая Р. Е. Предварительные результаты исследований улавливаемости атмосферных осадков осадкомерными приборами. Труды ГГИ, вып. 152, 1967.
4. Горбунова И. Г., Степанюк Т. П. Сравнение показаний наземных дождемеров различных конструкций. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
5. Горбунова И. Г. Результаты некоторых сравнительных наблюдений по дождемеру О-1М (см. наст. сборник).
6. Нечаев И. Н. Выбор элементов конструкции новой модели дождемера. Труды ГГО, вып. 230, 1969.
7. Нечаев И. И. Исследование погрешности измерения жидких осадков, вызванной испарением их из прибора. Труды ГГО, вып. 215, 1968.
8. Нечаев И. Н. Потеря осадков на смачивание осадкомеров и методика корректировки сумм осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
9. Струзер Л. Р., Голубев В. С., Горбунова И. Г. Предварительные результаты сравнений осадкомеров. Метеорология и гидрология, № 11, 1966.
10. Н. Karbaum. Der Niederschlag als Wasserhaushaltsgröße. Akademie Verlag, Berlin, 1969.

## О ПРИМЕНЕНИИ НАЗЕМНЫХ ДОЖДЕМЕРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКИХ ОСАДКОВ

Известно, что во всех странах в настоящее время применяются осадкомерные приборы разных конструкций. На гидрометеорологической сети станций почти всех стран и жидкие, и твердые осадки измеряют одним и тем же прибором. В некоторых конструкциях предусмотрена лишь смена коллекторов. Во всем остальном прибор остается неизменным и летом, и зимой. В течение последнего десятилетия во многих странах уделялось большое внимание исследованию ошибок систематического характера, присущих осадкомерам. Количественные оценки для стандартных приборов Гидрометслужбы СССР получены в работах [1, 2, 3, 4], для стандартного прибора Гидрометслужбы ГДР — в [6, 21]. Основные ошибки при измерении жидких осадков возникают вследствие влияния ветра (ветровая ошибка), потерь собранных осадков на смачивание стенок водосборного сосуда и потерь осадков на испарение из сосуда.

В целях устранения или снижения этих ошибок в работе [9] предложен прибор, представляющий собой модификацию существующего осадкомера Гидрометслужбы СССР. Потери на испарение у этого прибора сведены практически к нулю, а потери на смачивание уменьшены более чем вдвое и составляют при единичном измерении 0,07—0,1 мм (вместо 0,2 мм). Если устранить и ветровую ошибку, то прибором можно было бы пользоваться, не вводя никаких поправок в его показания. Достигнуть этого можно, установив осадкомер в таких условиях, где при выпадении осадков скорость ветра достаточно мала. В руководствах по гидрометеорологическим наблюдениям в некоторых странах именно из этих соображений рекомендуется устанавливать осадкомеры в защищенных от ветра местах (на лесных полянах, среди городских строений и т. п.). Эта мера, однако, далеко не везде выполнима и недостаточно надежна, поскольку в естественных условиях очень трудно подобрать настолько защищенное место, чтобы скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера была в нем всегда очень мала (меньше 1 м/сек).

Точно так же не устраняют ветровую ошибку и осадкомерные защиты. Из многочисленных сравнений осадкомеров разных конструкций установлено (см. работу [29]), что лучшие из ветровых защит — так называемые полуподвижные защиты, к которым

относится и защита осадкомера Третьякова, — тоже лишь уменьшают ветровую ошибку, но не устраняют ее полностью. Попытки усовершенствовать защиты предпринимаются на протяжении уже 100 лет, но после появления в 1871 г. первой защиты Нифера [25] ощутимых результатов они пока не дали и вряд ли могут дать.

Имеется еще один способ установки осадкомера в таких условиях, чтобы скорость ветра на уровне его приемного отверстия была мала. Это так называемая наземная установка прибора. Приемное отверстие помещается на одном уровне с поверхностью

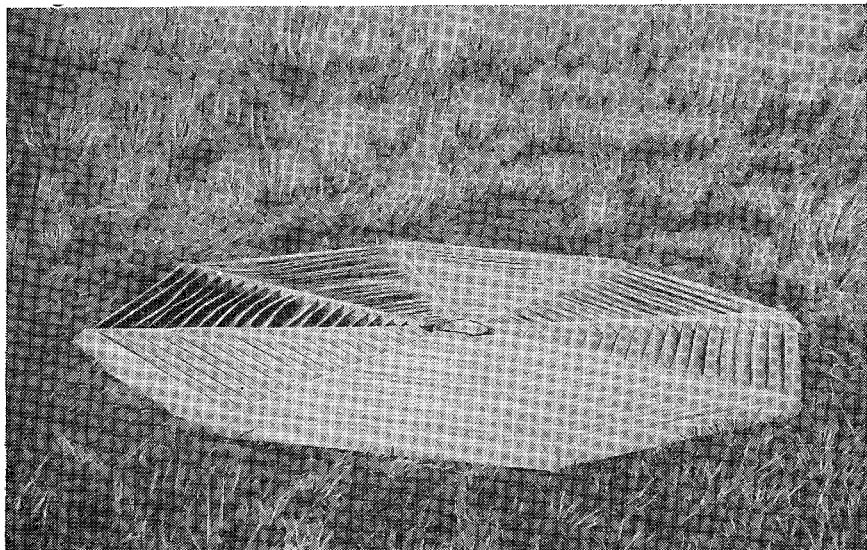


Рис. 1. Наземный дождемер с жалюзийной защитой. Воейково.

почвы. Для измерения твердых осадков такая установка непригодна. В отверстие набивается гораздо больше снега из-за переноса его при метелях и поземках, чем выпало на самом деле. Условия же, когда снегопереноса нет, отмечаются при выпадении жидких осадков и мокрого снега. Такой прибор, следовательно, лучше называть наземным дождемером. Его назначение — измерять жидкие осадки. Этот дождемер не имеет ветровой ошибки, так как средняя скорость ветра у поверхности земли равна нулю или очень мала. Однако в приемное отверстие, расположенное столь низко, могут попадать брызги, возникающие при разбрызгивании дождевых капель, упавших на окружающую дождемер поверхность. Тем самым показания такого прибора могут оказаться преувеличенными. Это соображение до самого последнего времени служило препятствием для применения наземного дождемера в качестве стандартного сетевого измерителя жидких осадков, хотя имеется большое количество работ, в которых этот прибор

используется в качестве эталонного дождемера. Для этого он снабжается противобрызговой защитой того или иного вида, в большинстве случаев достаточно сложной, громоздкой и относительно дорогой. И несмотря на это, многие авторы до сих пор высказывают сомнение в том, что защита даже большого размера предохраняет прибор от попадания в него брызг.



Рис. 2. Защита наземного дождемера в виде открытой сверху ямы диаметром 120 см (ямочный дождемер). Воейково.

Впервые конструкцию наземного дождемера с противобрызговой защитой предложил, насколько известно, в 1842 г. Стивенсон [27]. Он уложил вокруг дождемера войлочный коврик. В дальнейшем наземный дождемер все чаще применяется в экспериментальных исследованиях в качестве эталонного измерителя жидких осадков. В 1870—1871 гг. им пользовался Стоу [28], который установил дождемерное ведро на дно четырехугольной ямы. В 1905 г.

такую же конструкцию испытывал Н. В. Утехин [15]. Возникало сомнение, не приводит ли она к усилению ветра на уровне приемного отверстия ведра, расположенного в центре открытой сверху ямы относительно большого размера. Чтобы устранить это сомнение, яму сверху стали перекрывать сеткой с ячейками настолько крупными, что можно было не опасаться отбрызгивания от этой сетки, и в то же время достаточно мелкими, чтобы ветровой поток не проникал в яму под сеткой. Наиболее известная из таких работ — это работа Кошмидера [6]. Им же испытывался наземный дождемер, ведро которого закапывалось в землю, ямы вокруг не было, но на поверхность укладывался сплошной щит, внешняя сторона которого была покрыта щеткой. Щетинки этой щетки имитировали коротко подстриженный травяной покров. В последующих работах (см., например, [16, 18, 19, 20, 26]) применялись разнообразные противобрызговые защиты, в общем двух типов — либо в виде ямы, перекрытой или не перекрытой сверху (ямочный дождемер), либо в виде некоторого покрытия поверхности почвы вокруг приемного сосуда. Защита в виде открытой сверху ямы применялась в работах [2, 3] и особенно широко в работах [1, 10].

В 1957 г. Британская метеорологическая служба провела дискуссию по вопросу о точности измерения осадков (см. [24]). Подчеркивалось, что основным препятствием для применения наземного дождемера в качестве наиболее точного прибора является сомнение в отсутствии ошибок от забрызгивания. Поэтому в исследованиях ГГО, предпринятых в 1961 г., программа которых изложена в работе автора [10], в числе прочих задач предусматривалось получение оценок точности наземных дождемеров разных конструкций. В основном приборы отличались друг от друга радиусом противобрызговой защиты. Работы велись на нескольких экспериментальных базах. Наиболее важные результаты получены в Воейково, Валдае и Поти [4, 5]. На этих базах были установлены наземные дождемеры с максимально большой ( $3 \times 3$  м) противобрызговой защитой, выполненной в виде решетки с ячейками  $10 \times 10$  см из металлических пластин шириной 10 см, поставленных вертикально. Рядом находились приборы с защитами меньшего размера. Жалюзийная защита (рис. 1) диаметром 2 м, уложенная на дренающую подстилку, была предложена Блисдейлом [17] как эффективный и долговечный прибор сетевого назначения. Жалюзи из металлических пластин, поставленных под углом  $45^\circ$ , отбрасывают брызги к земле или в сторону от ветра. Защита в виде ямы диаметром 120 см, перекрытой мелкоячеистой проволочной сеткой, устраняла образование брызг и препятствовала проникновению турбулентных вихрей в яму. Наконец, защита в виде ямы также диаметром 120 см, но без сетки сверху (рис. 2) препятствовала лишь образованию брызг. В Воейково и на Валдае вокруг противобрызговых защит и на стенках ямы росла трава, в Поти из-за высокого стояния грунтовых вод пришлось стенки ямы выполнить из бетона, и защиты поэтому были окружены бетонным кольцом шириной около 10 см; во время

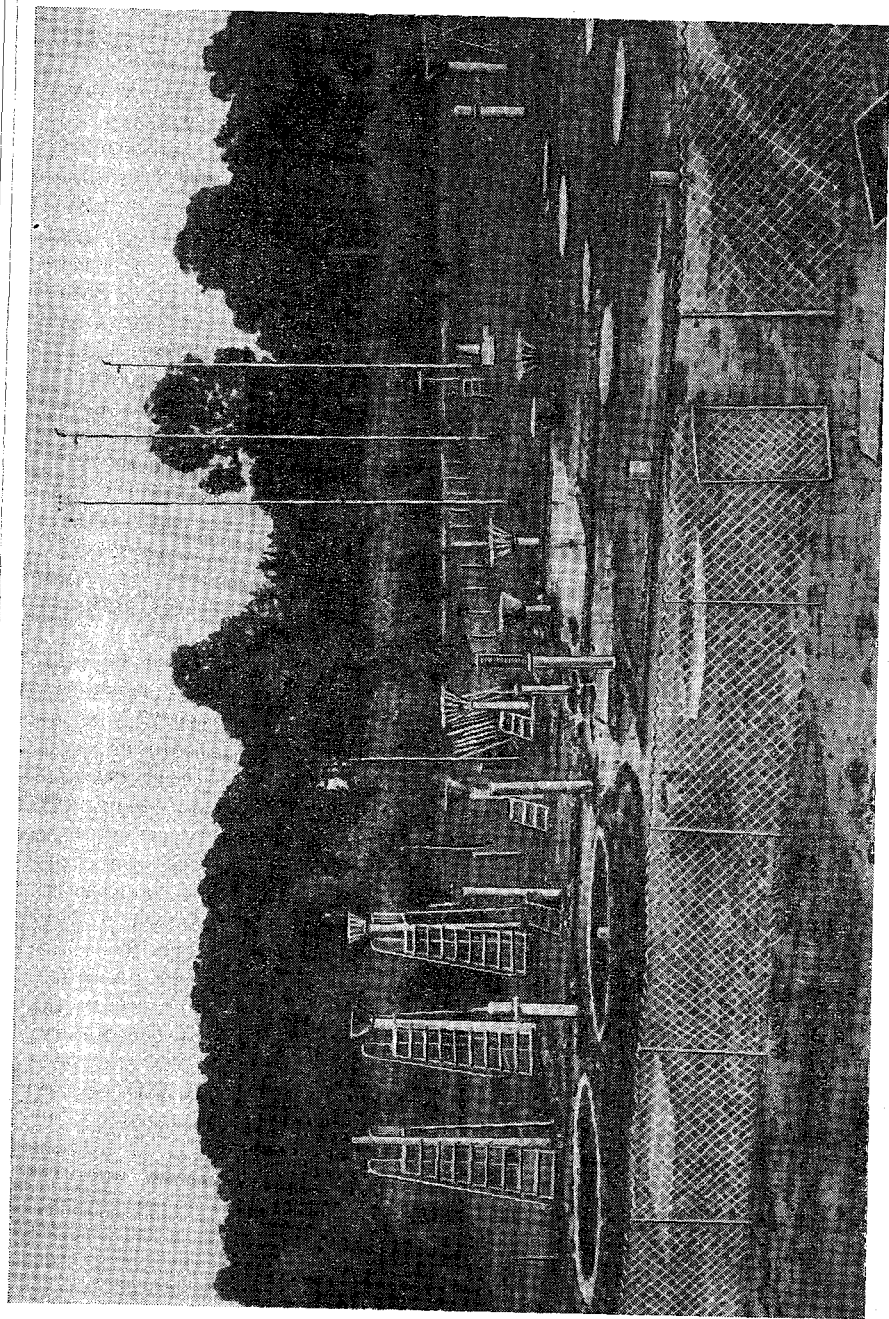


Рис. 3. Общий вид площадки экспериментальной базы в Потии.

интенсивных ливней, характерных для Поты, вокруг часто возникали лужи, на которых брызгообразование особенно сильно. На рис. 3 в качестве примера дан общий вид экспериментальной базы в Поты.

Материалы наблюдений показали, что между количествами осадков, измеренными разными наземными дождемерами, нет систематических различий. Так, например, даже в Поты, где дожди особо крупнокапельны, т. е. условия для разбрызгивания наиболее благоприятны, сумма осадков за 11 месяцев, собранная дождемером с решетчатой защитой, оказалась равной 1233,4 мм. Суммы осадков, собранные дождемером с жалюзийной защитой и ямочным дождемером с сеткой над ямой и без сетки, оказались больше на 2,9 (0,2), 1,5 (0,1) и 8,1 мм (0,7%) соответственно. Аналогичный результат был получен по материалу наблюдений всех баз. Сравнение за сопоставимые сроки показало, что различия в показаниях всех перечисленных наземных дождемеров составляют 0,1—1,3%, что практически можно считать полным совпадением. Вероятность различий за отдельный срок наблюдений, превышающих 0,2 мм, как показано в работе [5], очень мала, причем сами различия накопереченны, т. е. случайны. Зависимости их от диаметра защиты не обнаружено. Следовательно, противобрызговая защита самого малого из испытывавшихся размеров (радиусом 60 см) достаточна, чтобы практически можно было не считаться с влиянием забрызгивания на показания наземного дождемера.

Этот вывод был подтвержден и другим, не зависящим от первого, путем. В работе [12] был проведен лабораторный эксперимент, в котором капли известного размера падали с высоты 15,5 м на разные поверхности (твердая водонепроницаемая гладкая керамическая пластинка и водная поверхность), а брызги улавливались на фильтровальную бумагу с нанесенным на нее красящим порошком (эозин с фенолом). По размерам и количеству пятен определялась масса брызг и подсчитывалось их число на разных расстояниях от точки разбрызгивания. В результате удалось рассчитать погрешность от забрызгивания в зависимости от радиуса  $\rho$  приемного отверстия наземного дождемера, радиуса  $R$  его противобрызговой защиты, диаметра падающей капли  $d$  и вида разбрызгивающей поверхности. Скорость ветра принималась равной нулю. Влияние ветра на попадание брызг в приемное отверстие наземного дождемера с учетом логарифмической зависимости скорости ветра от высоты оценено расчетным путем в работе [13]. Ветер подхватывает брызги и тем самым увеличивает дальность их полета. Они начинают перемещаться с ветром не сразу, а по прошествии некоторого времени, тем большего, чем больше их инерция и чем меньше сила трения, возникающая между воздухом и брызгами, если они перемещаются относительно воздуха с некоторой скоростью. Известно, что эта сила пропорциональна разности скоростей брызг и воздуха в некоторой степени, возрастающей с увеличением самой разности. В целях упрощения расчета показатель степени  $n$  был принят равным двум, что соответствует

действительности лишь при большой относительной скорости брызг. При меньших скоростях показатель  $n < 2$ . Таким образом, расчет дал заведомо преувеличенные характеристики увлечения брызг ветром, т. е. преувеличенные оценки влияния ветра на ошибки забрызгивания в осадкомер.

Это замечание следует учитывать при рассмотрении кривых на рис. 4, где для дождямера с площадью приемного отверстия 200 см<sup>2</sup> представлены зависимости ошибки забрызгивания  $\eta$  (в % от количества выпавших осадков) от радиуса защиты  $R$  для монодисперсного дождя с диаметром капель  $d=3$  мм и дождя с диаметром капель  $d=5$  мм. Отбрызгивающая поверхность — вода. Кривые 1 и 3 действительны при штиле. Для капель с  $d=3$  мм ошибка отсутствует уже при  $R=30$  см, а для очень крупных капель ( $d=5$  мм) — только при  $R=90$  см. Если же  $R=60$  см, то ошибка при таких размерах хоть и заметна, но невелика и составляет 5%.

Кривые 2 и 4 на рис. 4 представляют собой результаты расчета при скорости ветра на высоте 2 м, равной 8 м/сек., что соответствует скорости ветра на высоте флюгера около 11 м/сек. Как следует из хода кривых, ветер увеличивает ошибку в сильной степени, особенно при малых радиусах защиты. При  $R=60$  см ошибка для крупной капли с  $d=5$  мм увеличивается вдвое, достигая 10%, а для капель с  $d=3$  мм по-прежнему отсутствует. Аналогичные расчеты для других отбрызгивающих поверхностей дают при  $R=60$  см несколько меньшие величины ошибок.

Естественные дожди не бывают монодисперсными. При любой интенсивности дождя капли выпадают всевозможных размеров, и лишь некоторая доля общего количества осадков формируется большими каплями, разбрызгивание которых значительно. Используя известную формулу Маршалла — Пальмера [22], можно вычислить эту долю крупнокапельных осадков при разных интенсивностях дождя. Расчеты показали, что капли с  $d \geq 5,2$  мм вовсе отсутствуют при интенсивности  $I \leq 0,75$  мм/мин., а при большей интенсивности доля их в общем объеме дождя растет, но даже при  $I=1$  мм/мин. не превышает 0,01. Капли с  $d \geq 2,5$  мм отсут-

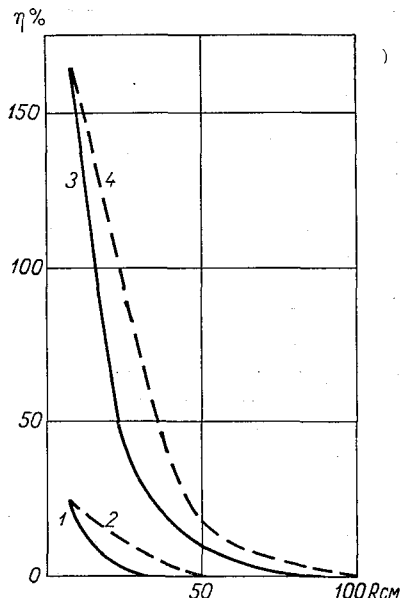


Рис. 4. Зависимость ошибок забрызгивания ( $\eta$  %) от радиуса противобрызговой защиты ( $R$  см).

1 и 3 — для капель диаметром 3 и 5 мм соответственно при штиле, 2 и 4 — для капель диаметром соответственно 3 и 5 мм при скорости ветра 8 м/сек. на высоте 2 м.

вуют при  $I \leq 0,06$  мм/мин., а их доля при  $I = 1$  мм/мин. достигает 0,46, т. е. составляет почти половину общего количества дождя. Соответственно погрешности от забрызгивания у ямочного дождемера даже при  $I = 1$  мм/мин. не превышают 0,4% суммы выпадавшего дождя при штиле и 1% — при скорости ветра 8 м/сек. Иначе говоря, погрешности ямочного дождемера с защитой диаметром 100—120 см остаются пренебрежимо малыми даже при очень интенсивном ливне, сопровождающемся сильным ветром.

Уже этого вывода достаточно, чтобы обосновать надежность наземных дождемеров. Если же учесть повторяемость дождей разной интенсивности в их сезонной сумме, а для каждой интенсивности рассчитать долю осадков, формирующуюся каплями большого диаметра ( $d > 2,5$  мм), то можно получить оценки погрешностей забрызгивания в сезонной сумме жидких осадков. В работе [13] это сделано по записям плувиографов пяти станций (табл. 1). Результаты показывают, что в климатологических расчетах с погрешностью забрызгивания в наземных дождемерах можно не считаться.

Если к сказанному добавить, что в большинстве случаев наземный дождемер окружает рыхлая почва или дерн, разбрызгивание от которых соответственно в 2 (согласно работе [2]) и в 4—5 раз меньше, чем от водной поверхности, то вывод о том, что эффектом забрызгивания в наземный дождемер можно пренебречь, станет еще очевиднее.

Таблица 1

Погрешность забрызгивания в наземный дождемер  
в процентах от сезонной суммы жидких осадков

(отбрызгивающая поверхность — вода, площадь  
приемного отверстия дождемера 200 см<sup>2</sup>, радиус  
противобрызговой защиты 50 см)

| Станция       | Погрешность, % |                                |
|---------------|----------------|--------------------------------|
|               | при штиле      | при скорости<br>ветра 8 м/сек. |
| Прибалтийская | 0,001          | 0,002                          |
| Придеснянская | 0,006          | 0,010                          |
| Нижнедевицкая | 0,003          | 0,005                          |
| Оренбург      | 0,008          | 0,014                          |
| Поти          | 0,022          | 0,038                          |

Проведенные исследования устраняют главное сомнение, препятствовавшее широкому использованию наземных дождемеров. Ими, следовательно, можно пользоваться как эталонными измерителями жидких осадков во всех экспериментальных работах. Однако, чтобы рекомендовать их в качестве стандартных измерителей жидких осадков на гидрометеорологических станциях и постах, нужно решить еще некоторые вопросы, связанные с эксплуатационно-техническими свойствами этих приборов.

Прежде всего возникает опасение, что в столь низко установленный дождемер будет попадать много песка и пыли. Можно оценить, в какой мере это отражается на результатах измерений. Пыль или песок, попадая в осадкомерный измерительный стакан вместе с водой, вылитой из водосборного сосуда, должна занять в нем объем  $2 \text{ см}^3$ , чтобы ошибка измерения осадков достигла 0,1 мм. Удельный вес минеральных частичек почвы около  $2 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, такая ошибка возникнет, если в стакане окажется 4 г песка. Часть песка или пыли, попавшей в осадкомер, остается в нем после выливания собранных осадков и задерживает некоторое количество воды. Известно, что объемный вес почвы в естественном залегании меняется в пределах  $1,2\text{—}1,6 \text{ г/см}^3$ . Считая удельный вес минеральных частиц почвы равным  $2 \text{ г/см}^3$ , получаем полную влагоемкость в пределах  $0,3\text{—}0,12 \text{ г воды/г почвы}$ . Следовательно, чтобы в ведре задержалось 0,1 мм осадков, т. е. 2 г воды, в нем должно собраться 6—17 г песка или минеральной пыли. Это больше  $5 \text{ см}^3$ . Такие же оценки получены экспериментально И. Г. Горбуновой, которая смачивала до предела (сливая остаток воды) пробу сухого песка и сухой пыли, образовавшейся на суглинистой дерново-подзолистой почве, а затем по разности весов влажной и сухой проб определяла удержанное ею количество воды. Оказалось, что для удержания 0,1 мм осадков нужно, чтобы в осадкомере с площадью приемного отверстия  $200 \text{ см}^2$  скопилось 5 г сухой пыли (около  $5 \text{ см}^3$ ), или 8 г сухого песка (около  $5 \text{ см}^3$ ). Такое большое количество пыли попадает в дождемер сравнительно редко, только в особых случаях или в особых условиях, например в пустыне, когда сильный ветер переметает песок, или во время пыльных бурь в степи опять-таки при сильном ветре. При таких условиях погоды осадки, как правило, не выпадают. Что касается стандартного станционного осадкомера, то пыль и песок, попадающие в него, не будут мешать измерению осадков, так как его ведро заменяется другим в каждый срок наблюдений независимо от того, выпадали осадки или нет.

В целях экспериментальной проверки этого вывода в 1966 г. на все станции, где имелись низко установленные дождемеры (в основном типа ГГИ-500 или ГГИ-3000), был разослан опросный лист. В своих ответах 171 станция сообщила, какого вида загрязнения дождемера мешали производству наблюдений и как часто такие случаи повторялись. Некоторые из них указали приближенно максимальное количество пыли или песка, оказавшееся в дождемере. К сожалению, из Узбекистана, Туркменистана и Таджикистана материалы не поступили. Обобщение, произведенное И. Г. Горбуновой, показало, что помехи реально наблюдались на 28 станциях (16% всего их количества), причем зональность не выявляется. Данные, полученные на станциях, были нанесены на карту (рис. 5). Отдельными значками указаны станции, где запыление настолько сильное, что может мешать наблюдениям, где оно слабое — не мешает наблюдениям, и где запыление вовсе не обнаруживалось. Станции, на которых помехи наблюдениям

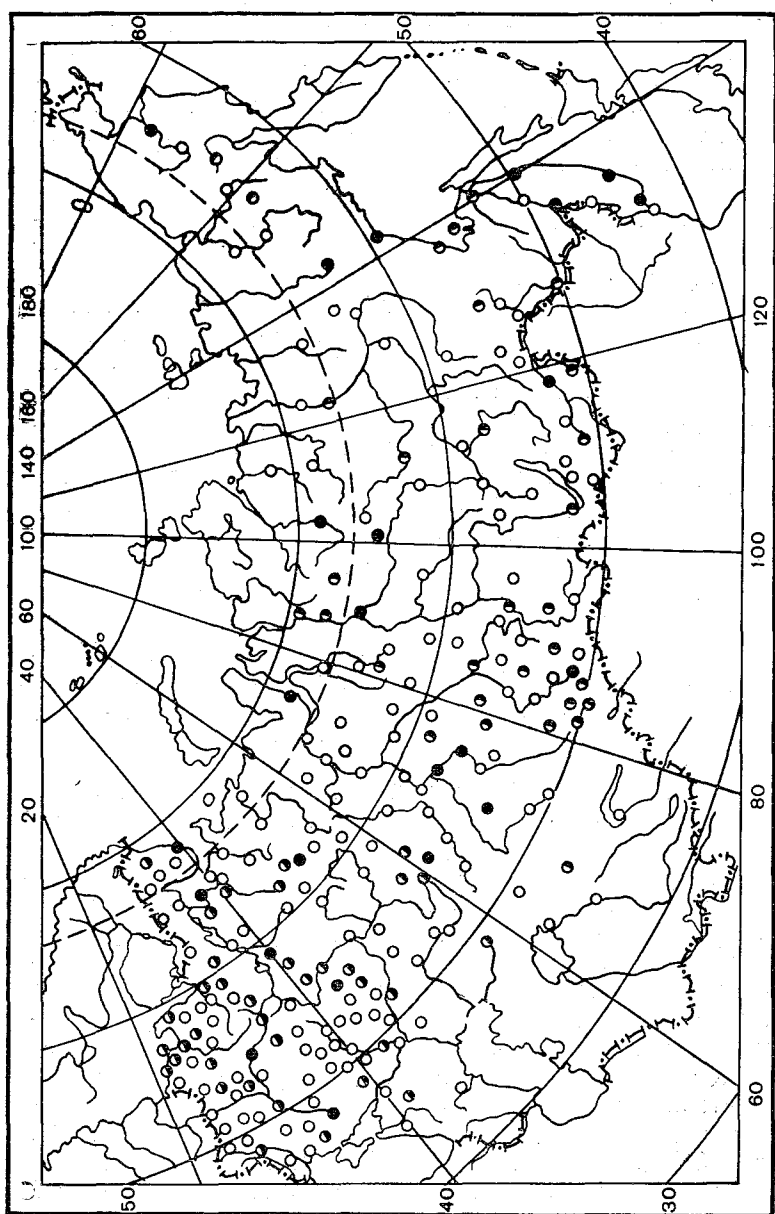


Рис. 5. Карта загрязнения наземных дождей.

1 — загрязнение пылью, песком, листьями и т. п. настолько сильное, что иногда возникают ошибки в измерении количества осадков, превышающие 0,1 мм, 2 — загрязнение слабое, производящее наблюдений не мешает, 3 — загрязнение отсутствует.

обусловлены не нилью или песком, а попаданием в дождемер листьев, ветвей и мелких животных, также отнесены к числу тех, где применение наземного дождемера сопряжено с помехами.

Выделяются лишь два сравнительно небольших по площади района, где на значительной части станций помехи существенны. Это полоса вдоль побережья Охотского и Японского морей и примерно территория Северного Казахстана, т. е. районы с сильным ветром. Кроме того, станции с существенными помехами встречаются на карте в самых неожиданных местах. На поверку оказалось, что в большинстве случаев это станции, расположенные неудачно — возле грейдерных дорог с интенсивным движением автотранспорта, вблизи взлетных полос аэродрома, около цементного завода и т. п.

Несмотря на то что примененный метод сбора сведений мог дать только грубую оценку, из рассмотрения карты следует вывод: помехи от запыления наземного дождемера наблюдаются лишь на небольшой части территории СССР и в основном там, где особенно сильны ветры.

При соблюдении существующего требования мыть водосборные сосуды в них может скопиться только то количество пыли, которое попадает за короткий промежуток времени между сроками наблюдений. Это соображение дополнительно подтверждает, что помехи от запыления наземного дождемера практически незначительны на большей части территории СССР.

Неудобства возникают, когда наземный дождемер приходится устанавливать в местах с близкими к поверхности грунтовыми водами или верховодкой. Тогда находящееся в яме или в гнезде ведро может всплыть и наблюдения сорвутся. Тот же эффект отмечается при неудачном выборе места установки прибора, когда при ливнях яма или гнездо заливается водой. Технически эти неудобства можно преодолеть с помощью водонепроницаемого покрытия ямы, запасных баков для отвода воды, дренажа и т. п. Вообще же подобные условия могут встретиться на сравнительно небольшой части территории СССР (зона вечной мерзлоты, болота, поймы рек и т. п.). Следует прямыми эксплуатационными испытаниями установить районы страны, где применять наземные дождемеры по указанным причинам, включая интенсивный перенос пыли и песка, практически нецелесообразно.

Могут встретиться затруднения, когда дождемер нужно установить на крутом склоне. Однако и в этом случае они не принципиальны, и соответствующими техническими приемами могут быть устранены.

Главным из проведенных исследований является вывод о правильности показаний наземного дождемера, об отсутствии ветровых ошибок и ошибок забрызгивания. Если водосборный сосуд прибора устроить так, чтобы потери собранных осадков на смачивание и испарение были малы, а это возможно (см. работу [9]), то показания такого наземного дождемера не потребуют коррек-

тировки. Тем самым будет решена задача правильного измерения по крайней мере жидких осадков.

Применение наземных дождемеров на гидрометеосети означает переход на новую систему измерения осадков, при которой жидкие и твердые осадки измеряются разными приборами. Насколько известно, такая система существует только в Канаде; она введена в действие с 1962 г. и показала свои преимущества. Вместо наземного дождемера там используются стандартные дождемеры метеорологической службы Великобритании [23], ветровая ошибка которых примерно в 2 раза меньше, чем у осадкомера Третьякова, так как их приемное отверстие располагается на высоте всего лишь 30 см. По-видимому, переход к измерению твердых и жидких осадков разными, специально для этого предназначенными приборами произошел именно в Канаде потому, что климат этой страны подобен климату большей части территории СССР, доля твердых осадков велика. Эта мера, несомненно, прогрессивна.

### Выводы

1. Наземные дождемеры уже давно (с 1842 г.) используются в экспериментальных научных работах в разных странах в качестве наиболее точного измерителя жидких осадков, но до последнего времени не было уверенности в отсутствии искажающего влияния забрызгивания на показания этих приборов.

2. Для устранения забрызгивания в наземный дождемер практически достаточно, чтобы противобрызговая защита имела радиус 60 см.

3. Наиболее простая противобрызговая защита в виде открытой сверху ямы практически выполняет свое назначение, т. е. устраняет забрызгивание не менее надежно, чем самые сложные, потому дорожке защиты (решетчатые, жалюзийные и т. п.).

4. На большей части территории СССР можно применять наземные дождемеры, не опасаясь помех из-за переноса песка и пыли или подтапливания водосборного сосуда грунтовыми водами.

5. На большей части осадкомерной сети СССР целесообразно перейти в ближайшем будущем к измерению жидких осадков наземными дождемерами со специально устроенными водосборными сосудами, такими, у которых потери собранных осадков на смачивание и испарение малы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Э. Г. Исследование ветровой погрешности измерения осадков. Труды ГГО, вып. 195, 1966.
2. Голубев В. С. Об учете дождевых осадков различными приборами. Труды ГГИ, вып. 81, 1960.
3. Голубев В. С. Оценка точности учета жидких осадков осадкомерами Третьякова. Труды ГГИ, вып. 95, 1962.
4. Горбунова И. Г. Предварительные результаты исследований в Воейково погрешностей измерения жидких осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.

5. Горбунова И. Г., Степанюк Т. П. Сравнение показаний наземных дождемеров различных конструкций. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
6. Кошмидер Х. Методы и результаты точных дождемерных наблюдений. IV Гидрологическая конференция Балтийских стран. Л., 1933. См. также: Koschmieder H. Methods and results of definite rain measurements. Mon. weath. Rev., wash., vol. 62, 1934.
7. Нечаев И. Н. Потери осадков на смачивание осадкомеров и методика корректировки сумм осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
8. Нечаев И. Н. Исследование погрешности измерения атмосферных осадков, вызванной испарением их из прибора. Труды ГГО, вып. 215, 1968.
9. Нечаев И. Н. Выбор элементов конструкции новой модели дождемера. Труды ГГО, вып. 230, 1968.
10. Струзер Л. Р. Основные недостатки и пути улучшения методов измерения атмосферных осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
11. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богданова Э. Г. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков. Метеорология и гидрология, № 10, 1965.
12. Струзер Л. Р., Дьячкова Т. В. О разбрызгивании дождевых капель. Труды ГГО, вып. 195, 1966.
13. Струзер Л. Р. и др. О погрешностях измерения осадков наземными дождемерами при наличии ветра. Труды ГГО, вып. 215, 1968.
14. Струзер Л. Р. Об учете количества осадков, выпадающих в горной местности. Материалы заседания Научного Совета 21—23 октября 1969 г. в Ташкенте. Ротапринт ГГИ, Л., 1970.
15. Утехин Н. В. Заслуживает ли предпочтения замена нормальной установки дождемеров установкой их в уровень поверхности почвы? Труды III съезда деятелей по сельскохозяйственному делу. СПб, 1905.
16. Aslyng H. C. Rain, Snow and Dew Measurements. Acta Agriculture Scandinavica, XV, N 3—4, Stockholm, 1965.
17. Bleasdale A. A. Measurement of rainfall. Weather, vol. XIV, No. 1, 1959.
18. Braak C. Influence of wind on rainfall measurements. Meded. Met. Inst., Serie A, No. 48, 1945.
19. Green M. Y. Effects of Exposure on the Cath of Rain Gauges. The Water Research Association, England, July, 1969.
20. Hoeck E. и Thams J. C. Zum Problem der Niederschlagsmessung. Geofisica pura e applicate. Milano, vol. XIX, No. 3—4, 1951.
21. Karbaum H. Der Niederschlag als Wasserhaushaltsgrösse. Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der DDR, No. 86 (Bd XI) Akademie—Verlag, Berlin, 1969.
22. Marshall J. S. and Palmer W. K. The distribution of raindrops with size. J. Met., vol. 5, No. 4, 1948.
23. Meteorological office. Observer's handbuck (second edition). London. Her majesty's stationery office, 1956.
24. Meteorological office discussion. Hydrology and British Rainfall. The Meteorol. Mag., vol. 86, July 1957, No. 1.
25. Mipher F. E. On the determination of the true rainfall in elevated gages. American Association for the Advancement of Science, vol. 27, 1878.
26. Stanhill G. Rainfall measurements at ground level. Weather, v. 13, N 1, 1958.
27. Stevenson T. On the defects of raingauges with description of an improved form. Edinb. New Phil. J., vol. 33, 1842.
28. Stow F. W. Rain — gauge experiments at Hawsker near Whit by Jorkshire. Brit. Rainfall, 1870, Brit. Rainfall, 1871.
29. Weiss L. L. and Wilson W. T. Precipitation gauge shields. General Assembly of Toronto. V. I. Intern. Assoc. Scientific Hydrology. Gentbrugge, 1958.

## О НЕОБХОДИМОСТИ СТРОГОГО КОНТРОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ ПРИЕМНОГО ОТВЕРСТИЯ ОСАДКОМЕРА

Осадкомер — один из самых простых и грубых по изготовлению метеорологических приборов. Может быть, поэтому в практике укоренилось невнимательное отношение к его установке и обслуживанию во время эксплуатации.

Имеющийся опыт инспекции гидрометеорологических станций и постов говорит о том, что при установке осадкомеров, как правило,

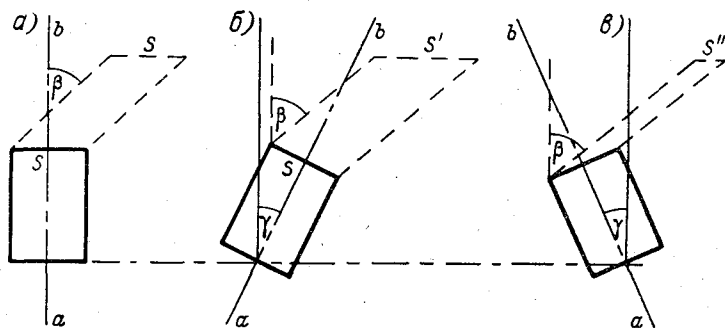


Рис. 1. Схема улавливания осадков осадкомером.

*a* — правильно установленный осадкомер; *б* — осадкомер, отклонившийся в сторону, откуда дует ветер; *в* — осадкомер, отклонившийся в сторону, куда дует ветер.

не проверяют по уровню горизонтальность приемной поверхности их сосудов; часто либо приемный сосуд качается в тагане, либо его приемная поверхность не строго горизонтальна. С этими малыми отступлениями обычно мирятся.

Настоящая заметка составлена с целью показать, какие ошибки возникают из-за неточности установки приемного сосуда, и призвать к строгому соблюдению требований Наставления.

На рис. 1 *a* схематически изображен сосуд осадкомера, установленный правильно (ось симметрии *ab* вертикальна). Считаем, что прибор работает идеально, т. е. не имеет ветровой погрешности. Под каким бы углом  $\beta$  к вертикали ни были наклонены траектории падения дождевых капель, этот осадкомер будет перехватывать поток капель, пронизывающий площадь *S* некоторой горизонтальной плоскости, и эта площадь равна площади приемного отверстия

сосуда. Если же ось сосуда наклонена навстречу потоку капель (рис. 1 б) так, что угол между его осью и вертикалью равен  $\gamma$ , то при всех  $\beta > \beta_0$  в его приемное отверстие будут попадать капли, пронизывающие площадь  $S'$  горизонтальной плоскости, причем  $S' > S$ . Такой прибор покажет преувеличенное количество осадков. Из простых геометрических соображений, поставив условие  $S' = S$ , легко показать, что  $\beta_0 = \frac{\gamma}{2}$ . При всех  $\beta < \beta_0$  оказывается  $S' < S$

и соответственно прибор получает преуменьшенное количество осадков. Точно так же, если сосуд будет наклонен на некоторый угол  $\gamma$ , но в обратную сторону (рис. 1 в), то в него попадут лишь капли из области  $S'' < S$ ; прибор получит преуменьшенное количество осадков.

Практически отклонение сосуда от правильного положения на  $1-2^\circ$  встречается постоянно. На глаз такое малое отклонение нельзя заметить, а уровнем положение ведра, как правило, не контролируется. Часто встречаются еще большие отклонения — вплоть до  $5^\circ$ . Они заметны на глаз, но на это не обращают внимания.

Рассчитаем, какие могут возникать ошибки при отклонениях до  $5^\circ$ .

Будем характеризовать положение плоскости приемного отверстия  $S$  сосуда в пространстве направляющим вектором  $s$ , перпендикулярным  $S$ , а положение плоскости  $F$ , перпендикулярной потоку капель, направляющим вектором  $f$  (рис. 2), направленным навстречу потоку. В приемное отверстие осадкомера попадает то же количество осадков, которое пересекает площадь  $F$ , но площадь приемного отверстия  $S$  больше  $F$ . Поэтому количество осадков  $x_n$  в расчете на единицу площади  $S$  будет меньше количества осадков  $x_\perp$  приходящихся на единицу площади  $F$ :

$$x_n = x_\perp \cos \varphi. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  — угол между направляющими векторами  $s$  и  $f$ . Известно, что

$$\cos \varphi = s_x f_x + s_y f_y + s_z f_z, \quad (2)$$

где  $s_x, s_y, s_z$  — составляющие вектора  $s$  вдоль осей неподвижной прямоугольной системы координат,  $f_x, f_y, f_z$  — то же вектора  $f$ . Оси  $x$  и  $y$  расположим в горизонтальной плоскости, ось  $z$  направим вертикально вверх.

Определим положение вектора  $s$  в пространстве (рис. 3) углом  $\gamma$  между вектором и вертикалью и углом  $\psi$  между осью  $y$  и горизонтальной проекцией вектора  $f$ . Соответствующие углы для вектора  $f$  назовем  $\beta$  и  $C$ . Из рис. 3 ясно, что:

$$\left. \begin{aligned} s_x &= \sin \gamma \cdot \sin \psi, & f_x &= \sin \beta \cdot \sin C \\ s_y &= \sin \gamma \cdot \cos \psi, & f_y &= \sin \beta \cdot \cos C \\ s_z &= \cos \gamma, & f_z &= \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), а результат в (1), получим

$$x_n = x_{\perp} [\sin \gamma \sin \beta \sin \psi \sin C + \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cos C + \cos \gamma \cos \beta]. \quad (4)$$

Если приемное отверстие осадкомера горизонтально, т. е.  $\gamma = 0$ , то  $x_n = x$ , где  $x$  — правильная величина осадков, выпадающих на горизонтальную поверхность. Из (4) следует в этом случае, что

$$x_{\perp} = \frac{x}{\cos \beta}. \quad (5)$$

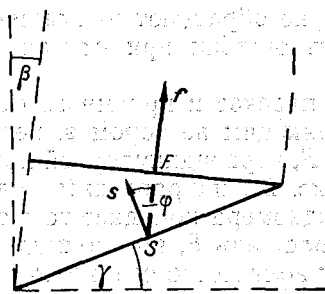


Рис. 2. Схема перехвата потока осадков приемным отверстием осадкомера.

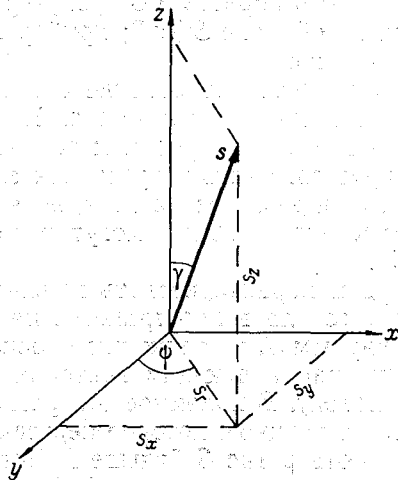


Рис. 3. Разложение вектора  $s$  на составляющие.

Подставляя значение  $x_{\perp}$  в (4), получим после некоторых тригонометрических преобразований

$$x_n = x \cos \gamma [1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta \cos (\psi - C)]. \quad (6)$$

Определим относительную ошибку, вызванную отклонением приемного отверстия осадкомера от горизонтального положения, выражением

$$\delta x = \frac{x_n - x}{x}. \quad (7)$$

Из (6) получаем

$$\delta x = \cos \gamma [1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta \cos (\psi - C)] - 1. \quad (8)$$

Если направить ось  $y$  неподвижной системы координат в сторону наклона осадкомера, то  $\psi = 0$  и выражение (8) приобретает следующий вид:

$$\delta x = \cos \gamma [1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta \cos C] - 1. \quad (9)$$

Анализ свойств функции, представленной выражением (9), позволяет заключить, что при данном угле наклона осадкомера  $\gamma$  и угле наклона осадков  $\beta$  она имеет максимум при  $C=0$ . Это максимальное значение будет:

$$\delta x|_{C=0} = \cos \gamma (1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta) - 1. \quad (10)$$

Иначе говоря, максимальное превышение  $x_n$  над  $x$  имеет место при  $C=0$  и выражается соотношением (10). Минимум функция (9) имеет при  $C=\pi$ :

$$\delta x|_{C=\pi} = \cos \gamma (1 - \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta) - 1. \quad (11)$$

Другими словами,  $x_n$  меньше  $x$  на максимальную величину при  $C=\pi$ , и это максимальное отличие выражается соотношением (11). Из (10) и (11) ясно, что максимальное преуменьшение осадков  $\delta x|_{C=\pi}$  по абсолютной величине больше, чем максимальное их преувеличение  $\delta x|_{C=0}$ . Заметим далее, что ошибка от наклона

осадкомера равна нулю не при  $C$ , равном  $\frac{\pi}{2}$  или  $\frac{3\pi}{2}$ , как это иногда утверждают, а при значениях  $C$ , которые получаются, если приравнять к нулю правую часть выражения (9):

$$\cos C = \frac{1 - \cos \gamma}{\operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta}. \quad (12)$$

При данном  $\gamma$  эти направления зависят от угла наклона дожда  $\beta$ .

Выражение (9) позволяет рассчитать ошибку от наклона осадкомера  $\delta x$  для разных наклонов и ориентаций осадков. В качестве примера, характерного для средних условий при выпадении обложных осадков, ограничимся расчетом при  $\beta=45^\circ$ . Величины получившихся при этом ошибок  $\delta x$  представлены в табл. 1. Анализируя таблицу, можно убедиться в том, что при погрешности установки осадкомера всего на  $1^\circ$  возникает систематическая ошибка до 1,7%. При больших отклонениях  $\gamma$ , например при отклонениях 2—3°, которые на глаз нелегко заметить, ошибки еще увеличиваются примерно в 2—3 раза. Иногда отклонения достигают явно заметной на глаз величины  $5^\circ$ . При этом возникают ошибки, с которыми уже нельзя не считаться — до 5—10%. Возможно, недостаточный контроль за точностью горизонтального положения приемных отверстий приборов и является главной причиной расхождений в показаниях близко (в нескольких метрах друг от друга) расположенных осадкомеров.

Неправильность установки приемного сосуда осадкомера сказывается не только на его показаниях в отдельные сроки наблюдений, но и на суммах за большие промежутки времени — декада, месяц. Даже в том случае, когда выпадение осадков равновероятно во всех направлениях, ошибки в таких суммах остаются заметными. Для этого простейшего случая их легко получить,

интегрируя  $(x_n - x)$  по всем  $C$  от 0 до  $2\pi$  в предположении, что  $\beta = \text{const}$

$$X_n - X = \int_0^{2\pi} x [\cos \gamma (1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \beta \cos C) - 1] dC. \quad (13)$$

Таблица 1

Ошибки в показаниях вертикально установленного осадкомера.  $\beta = 45^\circ$

(в процентах к величине осадков, измеряемой правильно установленным осадкомером)

| Ориентация осадков, град. | Угол отклонения осадкомера от номинального положения, град. |      |      |      |      |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                           | 1                                                           | 2    | 3    | 4    | 5    |
| 0                         | 1,7                                                         | 3,4  | 5,0  | 6,7  | 8,3  |
| 45                        | 1,2                                                         | 3,0  | 3,6  | 4,7  | 5,8  |
| 90                        | 0                                                           | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,4 |
| 135                       | -1,2                                                        | -3,2 | -3,8 | -5,2 | -6,6 |
| 180                       | -1,8                                                        | -3,7 | -5,4 | -7,2 | -9,1 |

Здесь  $X$  и  $X_n$  — правильная и искаженная суммы осадков за период. Интегрирование дает

$$\delta X = \frac{X_n - X}{X} = 2\pi (\cos \gamma - 1), \quad (14)$$

что, например, при  $\gamma = 5^\circ$  обуславливает ошибку  $\delta X \sim 2,5\%$ .

Если направления осадков и их наклон, как это обычно бывает, неравновероятны, то ошибки сумм осадков за большой период могут еще возрасти.

Заметим, что еще важнее строго следить за точной установкой приемного сосуда, когда осадкомер применяется в наклонном положении для измерения так называемых склоновых осадков  $x_c$ . Такими приборами пользуются для измерения количества осадков, приходящихся на единицу поверхности склона. Приемное отверстие в такой установке параллельно склону.

Если  $\alpha$  — уклон склона,  $B$  — его ориентация и осадкомер имеет те же параметры, то

$$x_c = x \cos \alpha [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (B - C)]. \quad (15)$$

При малом отклонении  $\Delta \alpha$  угла наклона осадкомера от номинального положения  $\alpha$  возникают ошибки  $\delta_\alpha x_c$ , которые при достаточно малых  $\Delta \alpha$  можно определить по формуле

$$\delta_\alpha x_c = \frac{1}{x_c} \frac{\partial x_c}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \frac{\operatorname{tg} \beta \cos (B - C) \cos \alpha - \sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta \cos (B - C) \sin \alpha + \cos \alpha} \Delta \alpha. \quad (16)$$

Для случая, когда  $\alpha = 30^\circ$ , а  $\beta = 45^\circ$ , величины ошибок приведены в табл. 2. Они несколько меньше, чем для осадкомера, расположенного вертикально, если осадки выпадают в направлении;

противоположном наклону осадкомера, и много больше (до десятков процентов) при направлении осадков в сторону наклона осадкомера. Практически это означает, что требования к точности установки для наклонного осадкомера еще выше, чем для обычного.

Т а б л и ц а 2

Ошибки в показаниях осадкомера, установленного  
наклонно под углом  $30^\circ$ .  $\beta=45^\circ$

(в процентах к величине осадков, измеряемой  
правильно установленным осадкомером)

| Ориентация<br>осадков,<br>град. | Угол отклонения осадкомера от<br>номинального положения, град. |       |       |       |       |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 1                                                              | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0                               | 0,4                                                            | 0,9   | 1,3   | 1,6   | 2,0   |
| 45                              | 0,1                                                            | 0,2   | 0,3   | 0,3   | 0,4   |
| 90                              | -1,0                                                           | -2,1  | -3,2  | -4,3  | -5,4  |
| 135                             | -3,7                                                           | -7,6  | -11,1 | -14,9 | -18,8 |
| 180                             | -6,6                                                           | -13,1 | -19,1 | -26,2 | -33,0 |

Необходимо подчеркнуть, что все выкладки и расчеты произведены выше в предположении, что осадкомер не имеет ветровой погрешности. Учет этой погрешности в зависимости от наклона прибора и ориентации осадков пока невозможен. Однако при выпадении жидких осадков и не слишком большом наклоне осадкомера изменение ветровой погрешности мало и, следовательно, результаты приведенных расчетов можно считать близкими к истине. Они показывают, что во избежание значительных ошибок при измерении осадков необходимо строго следить за правильностью установки осадкомера.

## К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ УВЛАЖНЕНИЯ ГОРНЫХ СКЛОНОВ

При измерении количества осадков на равнине ни у кого не вызывает сомнения, что осадкомер в принципе показывает именно то их количество, которое выпадает на участок земной поверхности той же площади, что и приемное отверстие осадкомера. В горах же обнаруживается явное несоответствие между увлажнением склонов и измеренным количеством осадков. Вопрос обсуждался неоднократно и специально рассматривался Генеральной ассамблеей Международной ассоциации научной гидрологии в Брюсселе в 1951 г. Гоэк в докладе [3] на этом заседании рекомендовал принимать специальные меры для определения истинного количества осадков, выпадающих на склоны; в работе же Серра по тому же вопросу [5] доказывалось, что такие меры в общем не нужны. Можно указать еще ряд работ, авторы которых приходят к сильно отличающимся друг от друга выводам по вопросу об оптимальной методике измерения осадков в горной местности.

Из продолжающейся до сих пор дискуссии выясняется главное; различие практических рекомендаций обусловлено различием практических целей, которые преследуются разными авторами. Выявляются две основные линии.

Гидропрогнозисты используют информацию об осадках в горах для прогнозирования объема стока и режима рек с горным питанием. Такие прогнозы в настоящее время составляются в основном по эмпирическим связям непосредственно между стоком и количеством осадков, которое измеряется обычными осадкомерами с горизонтальным приемным отверстием. Если сеть осадкомерных пунктов выбрана удачно, т. е. если построенная по данным этой сети связь достаточно тесная, то главная забота гидролога-прогнозиста заключается в том, чтобы не менялась эта сеть и методика наблюдений за осадками на ней. Однако такой чисто эмпирический метод сопряжен с неизбежными ошибками прогнозов, иногда значительными, а пути улучшения прогностических связей почти исчерпаны. Поэтому все чаще обращаются к воднобалансовому методу составления или хотя бы контроля прогнозов. В этом случае уже важно знать правильное количество осадков, выпадающих на водосбор в целом. При этом в литературе часто утверждается, что для не слишком малых водосборов нет необходимости учитывать различия в увлажнении склонов. Существующая осадкомерная

сеть и методика измерений осадков дает удовлетворительную информацию для составления водных балансов. Однако количественного критерия, который позволил бы определить, какой бассейн достаточно велик, до сих пор нет.

Фактически все процессы влагообмена происходят на реальной поверхности склонов. Поэтому, как пишет И. С. Соседов [1], осадки, выпадающие непосредственно на склон, являются важным элементом воднобалансовых и теплобалансовых исследований в горной местности. Особенно важно знать, сколько выпало осадков непосредственно на некоторый склон, когда речь идет об исследовании водной эрозии или о составлении водного баланса сельскохозяйственных угодий, расположенных на этом склоне.

В настоящей работе предпринята попытка получить упомянутый количественный критерий для размеров горного бассейна и разработать метод расчета различий в увлажнении противоположных склонов горной долины. Будем пользоваться при этом терминологией, принятой в литературе.

### Основные соотношения

Капли дождя (или снежинки) при ветре падают наклонно. Поэтому поверхности, ориентированные различным образом, и поверхности с разным уклоном получают различное количество осадков.

Рассмотрим в пространстве три плоскости: горизонтальную ( $G$ ), наклонную ( $S$ ) и перпендикулярную потоку капель ( $F$ ). Их положение будем характеризовать ортами  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{f}$  векторов, нормальных к этим плоскостям. Пусть  $\mathbf{g}$  ориентирован вверх по вертикали,  $\mathbf{s}$  — во внешнюю сторону так, что углы между  $\mathbf{g}$  и  $\mathbf{s}$  — острые, вектор  $\mathbf{f}$  — навстречу потоку капель.

Назовем поток дождя, пересекающий горизонтальную плоскость, метеорологическими осадками  $x$ , поток через наклонную плоскость ( $S$ ) — склоновыми осадками  $x_c$ ; обозначим поток через плоскость  $F$  через  $x_\perp$ , а количество осадков, приходящееся на единицу площади горизонтальной проекции наклонной плоскости ( $S$ ) — через  $x_r$ , который назовем гидрологическими осадками. Все потоки измеряются в граммах на единицу площади соответствующей плоскости или в миллиметрах слоя воды на этой плоскости.

На площадь  $S$  попадает то же количество воды, которое пересекает площадь  $F$ , но  $S > F$ . Поэтому  $x_c < x_\perp$ ; они связаны соотношением

$$x_c = x_\perp \cos \varphi. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  — угол между векторами  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{f}$ . Известно, что

$$\cos \varphi = s_\xi f_\xi + s_\eta f_\eta + s_\zeta f_\zeta, \quad (2)$$

где  $s_\xi$ ,  $s_\eta$ ,  $s_\zeta$  — составляющие вектора  $\mathbf{s}$ , а  $f_\xi$ ,  $f_\eta$ ,  $f_\zeta$  — составляющие вектора  $\mathbf{f}$  вдоль осей неподвижной прямоугольной системы

координат, у которой оси  $\xi$  и  $\eta$  расположены в горизонтальной плоскости, а ось  $\zeta$  направлена вертикально вверх (рис. 1).

Пусть вектор  $s$  определен в пространстве (рис. 2) углом  $\alpha$  между ним и вертикалью (уклон склона) и углом  $B$  между его горизонтальной проекцией и осью  $\eta$  (ориентация склона). Пусть аналогично вектор  $f$  определен углом  $\beta$  между ним и вертикалью (наклон траекторий дождевых капель, или сокращенно — наклон осадков) и углом  $C$  между его горизонтальной проекцией и осью  $\eta$  (ориентация траекторий дождевых капель, или сокращенно — ори-

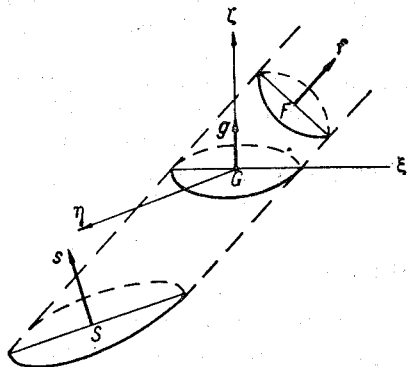


Рис. 1. Схема сечения потока дождя плоскостями разного уклона и ориентации.

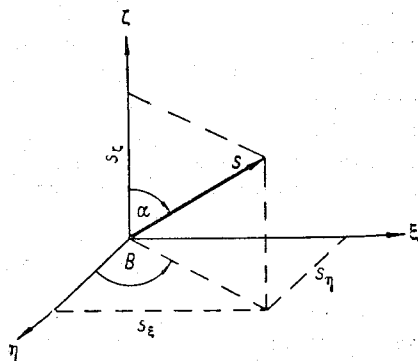


Рис. 2. Разложение вектора  $s$  на составляющие.

Таблица 1  
Компоненты векторов  $s$  и  $f$

| Проекция                    | $s$                  | $f$                 |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| Горизонтальная              | $\sin \alpha$        | $\sin \beta$        |
| На ось $\eta$               | $\sin \alpha \cos B$ | $\sin \beta \cos C$ |
| На ось $\xi$                | $\sin \alpha \sin B$ | $\sin \beta \sin C$ |
| На вертикальную ось $\zeta$ | $\cos \alpha$        | $\cos \beta$        |

ентация осадков). В этих обозначениях можем написать значения компонент векторов  $s$  и  $f$ , приведенные в табл. 1. Подставляя их в формулу (2), а результат в формулу (1), получим

$$x_c = x_{\perp} (\sin \alpha \sin \beta \sin B \sin C + \sin \alpha \sin \beta \cos B \cos C + \cos \alpha \cos \beta), \quad (3)$$

откуда

$$x_c = x_{\perp} [\sin \alpha \sin \beta \cos (B - C) + \cos \alpha \cos \beta]. \quad (4)$$

Для горизонтальной поверхности  $\alpha = 0$ , и из (4) получаем

$$x = x_{\perp} \cos \beta. \quad (5)$$

С учетом (3) соотношение (2) примет вид

$$x_c = x \cos \alpha [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (B - C)]. \quad (6)$$

Гидрологические осадки  $x_r$  получаются равными:

$$x_r = x [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (B - C)]. \quad (7)$$

Формулы (5), (6) и (7) — основные для решения ряда задач гидрометеорологии горных осадков. Расчеты  $x_{\perp}$ ,  $x_c$  и  $x_r$  по  $x$  возможны, если известны характеристики поверхности, воспринимающей осадки, т. е. если известны ее уклон  $\alpha$  и ориентация  $B$ , и если при этом известны характеристики потока осадков, т. е. наклон  $\beta$  траекторий падения капель (снежинок) и ориентация  $C$  этих траекторий.

### Средний слой осадков, выпадающих на бассейн в целом

Рассмотрим, какие ошибки в определении среднего слоя осадков  $X$ , выпадающих на бассейн в целом, получаются при использовании существующей методики их измерения обычными осадкомерами с горизонтальным приемным отверстием.

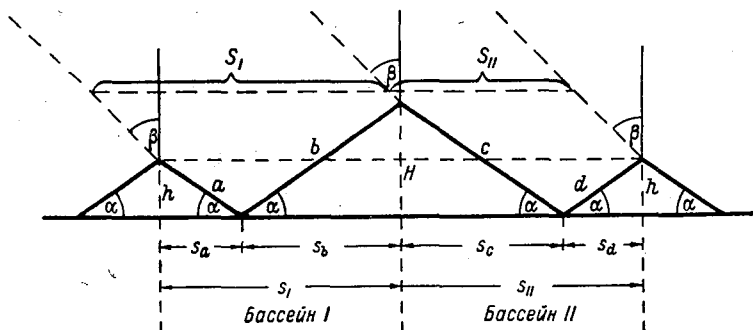


Рис. 3. Схема вертикального разреза двух соседних горных долин.

В литературе часто встречается утверждение, что для определения  $X$  нет необходимости интересоваться гидрологическими осадками  $x_r$ , так как  $X$  достаточно близко к среднему значению метеорологических осадков  $x$ , полученному по данным осадкомерных пунктов в бассейне.

Покажем, при каких условиях изложенное утверждение неверно. На рис. 3 схематически представлен вертикальный разрез двух соседних параллельных горных долин. Для упрощения схемы и соответствующих расчетов будем считать, что долины отличаются только тем, что у долины I левый склон имеет большую протяженность, чем правый, а у долины II, наоборот, протяженность правого склона больше левого. Это соответствует случаю, когда

хребет, разделяющий долины, выше других хребтов, отделяющих их от соседних долин. Уклоны всех склонов одинаковы и равны  $\alpha$ . Площади  $s_I$  и  $s_{II}$  горизонтальных проекций таких долин одинаковы.

Примем упрощающее физическое допущение, которое на самом деле в природе не выполняется, и в тем большей степени, чем сильнее выражен горный характер рельефа. Будем считать, что в каждый данный момент траектории движения элементов осадков прямолинейны и параллельны во всем пространстве над рассматриваемыми двумя долинами. Если при этом долины достаточно близки, чтобы интенсивность осадков над ними была одинаковой, то обычный осадкомер, установленный в любом месте в пределах этих долин, покажет одинаковые метеорологические осадки  $x$ . Умножая  $x$  на одинаковые площади бассейнов  $s_I$  и  $s_{II}$ , заключим, что рассматриваемые два бассейна получили одинаковое количество осадков:  $xs_I = xs_{II}$ . Такое заключение оказывается справедливым только при отсутствии ветра, когда дождь падает вертикально. На рис. 3 изображен случай падения дождя под углом  $\beta$ . Из рисунка видно, что общие суммы осадков, выпадающие на два рассматриваемых бассейна, неодинаковы. Бассейн *I* получает осадки с площади  $S_I$ , которая больше его собственной площади  $s_I$ , а бассейн *II* — с площади  $S_{II}$ , которая меньше его площади  $s_{II}$ . Бассейн *I* как бы перехватывает часть осадков, которая при отсутствии хребтов выпала бы на бассейн *II*. Расчет этого перехвата элементарен.

Пусть склон  $a$  долины *I* и склон  $c$  долины *II* имеют одинаковую ориентацию  $B$ , а склоны  $b$  и  $d$  — противоположную ей — ориентацию  $-B$ .

Согласно формуле (7), количество осадков, выпадающих на площади  $s_a, s_b, s_c, s_d$  проекций этих склонов, определяется соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} s_a x_{r, a} &= s_a x [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (B - C)] \\ s_b x_{r, b} &= s_b x [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (-B - C)] \\ s_c x_{r, c} &= s_c x [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (B - C)] \\ s_d x_{r, d} &= s_d x [1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos (-B - C)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Следовательно, бассейны *I* и *II* получают количество осадков  $X_I$  и  $X_{II}$ :

$$\left. \begin{aligned} X_I &= s_a x_{r, a} + s_b x_{r, b} = x (s_a + s_b) + A_I \\ X_{II} &= s_c x_{r, c} + s_d x_{r, d} = x (s_c + s_d) + A_{II} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_I &= x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta [(s_a + s_b) \cos B \cos C + (s_a - s_b) \sin B \sin C] \\ A_{II} &= x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta [(s_c + s_d) \cos B \cos C + (s_c - s_d) \sin B \sin C] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Величина  $A_I$  представляет собой разность между суммой осадков, которую получает долина *I*, и суммой осадков, вычисленной обычным способом; величина  $A_{II}$  — такую же разность для долины *II*. Эти разности, таким образом, характеризуют ошибку

обычных расчетов. В процентах к количеству осадков, рассчитанному обычным способом, они выражаются соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \delta X_I &= \frac{A_I}{xs_I} 100 = \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \times \\ &\times \left[ \cos B \cos C + \frac{s_a - s_b}{s_I} \sin B \sin C \right] 100\% \\ \delta X_{II} &= \frac{A_{II}}{xs_{II}} 100 = \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \times \\ &\times \left[ \cos B \cos C + \frac{s_c - s_d}{s_{II}} \sin B \sin C \right] 100\% \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Если ось  $\eta$ , относительно которой определяется ориентация склонов  $B$  и осадков  $C$ , направить параллельно осям долин и считать, что ветер дует поперек долин, то  $B = C = \frac{\pi}{2}$  и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \cos B &= \cos C = 0 \\ \sin B &= \sin C = 1 \end{aligned} \right\}$$

Тогда выражения (11) примут простой вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta X_I &= 100 \frac{s_a - s_b}{s_I} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta^0\% \\ \delta X_{II} &= 100 \frac{s_c - s_d}{s_{II}} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta^0\% \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В нашем примере  $s_I = s_{II}$ ,  $s_a = s_d$ ,  $s_b = s_c$ . Поэтому  $\frac{s_a - s_b}{s_I} = -\frac{s_c - s_d}{s_{II}}$  и соответственно  $\delta X_I = -\delta X_{II}$ . Иначе говоря, бассейн  $I$  получает дополнительно столько осадков, сколько их теряет бассейн  $II$ .

Чтобы составить представление о возможной величине ошибки  $\delta X$ , рассчитаем ее. Учтем, что для взятого простого примера действительно соотношение  $\frac{s_c}{s_b} = \frac{h}{H}$ , где  $h$  — высота меньшего хребта, а  $H$  — большего. В табл. 2 приведены величины  $\delta X$  для разных  $n = \frac{h}{H}$  при различных уклонах склонов  $\alpha$  и наклонах осадков  $\beta$ . Согласно этим данным, ошибка расчета  $X$  по обычным осадкомерам достигает заметной величины лишь при большой разнице высот водораздельной линии бассейнов ( $n \leq 0,5$ ) и значительном наклоне осадков и уклоне склонов. Следовательно, ошибки будут заметны лишь в условиях высокогорья в бассейнах с крутыми склонами ( $\alpha > 10^\circ$ ) при значительной скорости ветра. В этих условиях для составления водных балансов нужно знать гидрологические осадки.

Таблица 2

Величины  $\delta X$  в зависимости от соотношения высот хребтов  $n$   
уклона склонов  $\alpha$  и наклона дождя  $\beta$

| $\beta^\circ$ | $\alpha^\circ$ |     |     |     |         |     |     |    |
|---------------|----------------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|----|
|               | 5              | 10  | 30  | 45  | 5       | 10  | 30  | 45 |
|               | $n=0,9$        |     |     |     | $n=0,7$ |     |     |    |
| 5             | 0              | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,1     | 0,3 | 0,9 | 2  |
| 20            | 0,2            | 0,3 | 1   | 2   | 0,5     | 1   | 4   | 7  |
| 40            | 0,4            | 0,7 | 2   | 4   | 1       | 3   | 9   | 15 |
|               | $n=0,5$        |     |     |     | $n=0,3$ |     |     |    |
| 5             | 0,3            | 0,5 | 2   | 3   | 0,4     | 0,9 | 3   | 5  |
| 20            | 1              | 2   | 7   | 12  | 2       | 3   | 11  | 20 |
| 40            | 2              | 5   | 16  | 28  | 4       | 8   | 26  | 45 |

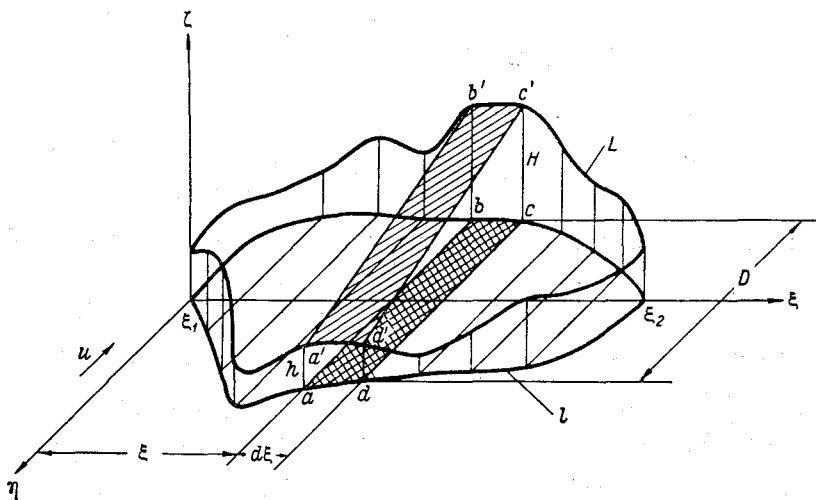


Рис. 4. Водораздельная линия ( $L$ ) и ее горизонтальная проекция ( $l$ ).

В общем виде задачу об оценке возможной ошибки расчета слоя осадков, выпавших на бассейн в целом, можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется конкретный бассейн, конфигурация границ которого представлена на карте замкнутой кривой  $l$  (рис. 4), являющейся проекцией пространственной кривой  $L$  водораздельной линии. Оценим отдельно возможную ошибку при ветре каждого румба. Направим ось  $\eta$  неподвижной системы координат навстречу ветру данного румба, а затем прямыми, параллельными  $\eta$ , выделим на карте полосу  $abcd$  элементарной

ширины  $d\xi$  от  $\xi$  до  $\xi + d\xi$ . Эта полоса является горизонтальной проекцией элемента  $a'b'c'd'$  наклонной плоскости с ориентацией  $B=0$ . Отметим высоту  $h$  над ур. м. точки пространственной кривой  $L$ , расположенной над началом выделенной на карте полосы, и высоту  $H$  точки над концом полосы. Обозначим площадь выделенной на карте полосы через  $dS$ . Ясно, что

$$dS = D d\xi, \quad (13)$$

где  $D$  — длина отрезка  $\overline{ab}$ , т. е. длина элементарной полосы. Она является функцией  $\xi$ .

Количество воды  $dx_r$ , получаемой элементарной полосой, будет

$$dx_r = x_r dS.$$

Выражая  $x_r$  по формуле (7),  $dS$  — по формуле (13) и учитывая, что  $B=0$ , можем написать:

$$dx_r = x [\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \cos C + 1] D d\xi. \quad (14)$$

Легко сообразить, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H(\xi) - h(\xi)}{D(\xi)} \quad (15)$$

и что количество метеорологических осадков, получаемое элементарной полосой,

$$dx = x D d\xi. \quad (16)$$

Соответственно общее количество метеорологических осадков на всю площадь бассейна

$$X = \int_{\xi_1}^{\xi_2} dx = x \int_{\xi_1}^{\xi_2} D d\xi, \quad (17)$$

а общее количество гидрологических осадков, приходящееся на ту же площадь, с учетом (15) можно представить в виде

$$X_r = \int_{\xi_1}^{\xi_2} dx_r = \int_{\xi_1}^{\xi_2} x \left[ \frac{H-h}{D} \operatorname{tg} \beta \cos C + 1 \right] D d\xi.$$

Здесь от  $\xi$  зависят только  $H$ ,  $h$  и  $D$ . Поэтому последнее выражение можно переписать в виде

$$X_r = x \operatorname{tg} \beta \cos C \int_{\xi_1}^{\xi_2} (H - h) d\xi + x \int_{\xi_1}^{\xi_2} D d\xi. \quad (18)$$

Последнее слагаемое в (18) представляет собой, как это ясно из (17), количество получаемых бассейном метеорологических осадков.

Таким образом, используя (17) и (18), разницу  $\delta X$  можно получить по формуле

$$\delta X = \frac{X_r - X}{X} = \operatorname{tg} \beta \cos C \frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} (H - h) d\xi}{S}, \quad (19)$$

где  $S$  — площадь горизонтальной проекции бассейна,  $X_r$  — количество гидрологических осадков, получаемое бассейном в целом,  $X$  — количество метеорологических осадков, вычисляемое для бассейна обычным способом.

Обозначим

$$R = \frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} (H - h) d\xi}{S} \quad (20)$$

и запишем это выражение в виде

$$R = \frac{\frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} (H - h) d\xi}{\int_{\xi_1}^{\xi_2} d\xi}}{\frac{\int_{\xi_1}^{\xi_2} D d\xi}{\int_{\xi_1}^{\xi_2} d\xi}} = \frac{\overline{H - h}}{\overline{D}}. \quad (21)$$

Поскольку ось  $\eta$  направлена навстречу ветру, ориентация осадков  $C = 0$  и соответственно  $\cos C = 1$ . При угле наклона осадков  $\beta = 45^\circ$  величина  $\operatorname{tg} \beta = 1$ . Следовательно, множитель  $R$  есть относительная погрешность  $\delta X_r$  для данного направления ветра  $C$  при наклоне осадков  $\beta = 45^\circ$ .

Выражение (21) позволяет предложить практически приемлемый метод расчета  $R$  для конкретного бассейна. На карте (рис. 5) следует провести водораздельную линию исследуемого бассейна, а затем соединить противоположные стороны бассейна прямыми, параллельными некоторому направлению ветра и находящимися на одинаковом расстоянии друг от друга. У пересечения каждой прямой с водораздельной линией определяется отметка над уровнем моря  $h_i$  для наветренной точки и  $H_i$  для подветренной. Определяется также поперечный размер бассейна  $D_i$  вдоль каждой  $i$ -той прямой ( $i$  — номера секущих кривых). Результат выписывается по форме, которая дана в табл. 3. Если прямая пересекает бассейн несколько раз (например, прямые 3 и 4 на рис. 5), то в таблицу записываются  $h_i$  и  $H_i$  и  $D_i$  для каждого отрезка прямой (например, для отрезков 3 и 4 и отрезков 3' и 4' отдельно). Подсчитывается  $\bar{h}$ ,  $\bar{H}$  и  $\bar{D}$ , а затем по формуле (21) вычисляется  $R$  для данного направления ветра. На рис. 5 а дан пример для южного ветра, а на

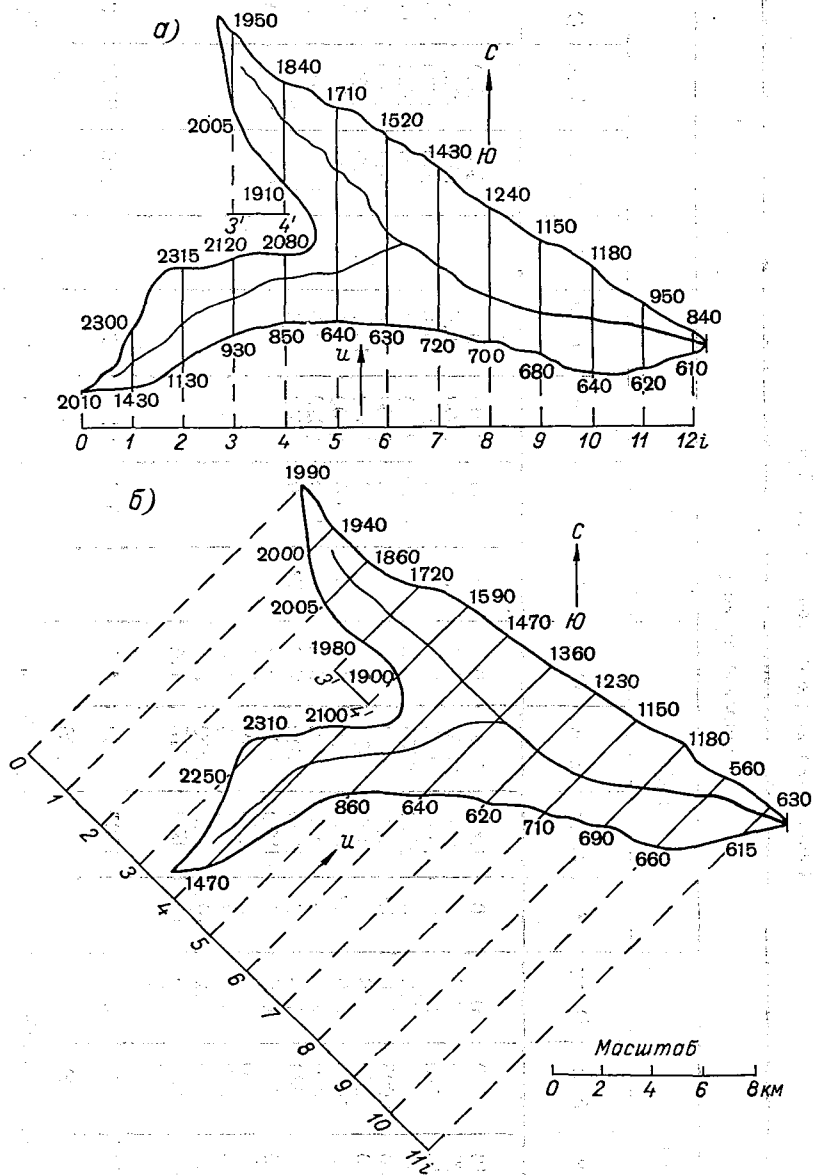


Рис. 5. Границы горного бассейна на карте.

*a* — сечение для ветра с юга, *b* — сечение для ветра с юго-запада.

## Сводка характеристик горного бассейна

## Направление ветра

| Ю                       |            |            |                  | ЮЗ       |            |            |                  | З        |            |            |                | СЗ       |            |            |                    |
|-------------------------|------------|------------|------------------|----------|------------|------------|------------------|----------|------------|------------|----------------|----------|------------|------------|--------------------|
| <i>i</i>                | <i>H м</i> | <i>h м</i> | <i>D км</i>      | <i>i</i> | <i>H м</i> | <i>h м</i> | <i>D км</i>      | <i>i</i> | <i>H м</i> | <i>h м</i> | <i>D км</i>    | <i>i</i> | <i>H м</i> | <i>h м</i> | <i>D км</i>        |
| 0                       | 2010       | 2010       | 0                | 0        | 1990       | 1990       | 0                | 0        | 1990       | 1990       | 0              | 0        | 600        | 600        | 0                  |
| 1                       | 2300       | 1430       | 2,2              | 1        | 1940       | 2000       | 1,4              | 1        | 1900       | 2000       | 1,6            | 1        | 615        | 1200       | 8,0                |
| 2                       | 2315       | 1180       | 3,8              | 2        | 1860       | 2005       | 2,4              | 2        | 1620       | 2000       | 5,0            | 2        | 640        | 1800       | 16,0               |
| 3                       | 2120       | 930        | 3,0              | 3        | 2310       | 2250       | 1,8              | 3        | 1430       | 1930       | 6,5            | 3        | 700        | 1990       | 14,5               |
| 3'                      | 1950       | 2005       | 3,0              | 3'       | 1720       | 1980       | 3,2              | 4        | 1210       | 2000       | 7,6            | 4        | 640        | 2010       | 4,7                |
| 4                       | 2080       | 850        | 2,6              | 4        | 2100       | 1470       | 8,0              | 5        | 1180       | 2310       | 16,7           | 5        | 690        | 2100       | 3,5                |
| 4'                      | 1840       | 1910       | 4,0              | 4'       | 1590       | 1900       | 4,0              | 6        | 900        | 2300       | 21,7           | 6        | 890        | 2290       | 3,2                |
| 5                       | 1710       | 640        | 8,4              | 5        | 1470       | 860        | 8,8              | 7        | 1300       | 2020       | 2,3            | 7        | 1070       | 2300       | 3,0                |
| 6                       | 1520       | 630        | 7,4              | 6        | 1360       | 640        | 7,2              | 7'       | 620        | 640        | 1,4            | 8        | 1300       | 2290       | 2,0                |
| 7                       | 1430       | 720        | 6,6              | 7        | 1230       | 620        | 6,2              |          |            |            |                | 9        | 1680       | 2085       | 0,8                |
| 8                       | 1240       | 700        | 5,4              | 8        | 1150       | 710        | 5,0              |          |            |            |                |          |            |            |                    |
| 9                       | 1150       | 680        | 4,8              | 9        | 1130       | 690        | 4,4              |          |            |            |                |          |            |            |                    |
| 10                      | 1180       | 640        | 4,2              | 10       | 960        | 660        | 3,8              |          |            |            |                |          |            |            |                    |
| 11                      | 950        | 620        | 2,6              | 11       | 630        | 615        | 1,4              |          |            |            |                |          |            |            |                    |
| 12                      | 840        | 810        | 0,6              |          |            |            |                  |          |            |            |                |          |            |            |                    |
| Среднее                 | 1640       | 904        | 3,9              |          | 1535       | 1300       | 4,1              |          | 1520       | 2145       | 7,8            |          | 980        | 2073       | 6,2                |
| $(\bar{H} - \bar{h})$ м |            | 736        |                  |          |            | 235        |                  |          |            | -625       |                |          |            | -1093      |                    |
|                         |            |            | $R_{Ю} = 18,9\%$ |          |            |            | $R_{ЮЗ} = 5,8\%$ |          |            |            | $R_3 = -8,0\%$ |          |            |            | $R_{СЗ} = -17,6\%$ |

рис. 5 б — для юго-западного ветра. В таблицу вносятся результаты таких операций для четырех румбов, например (как это сделано в табл. 3) для Ю, ЮЗ, З и СЗ. Тем самым определяются  $R_{\text{Ю}}$ ,  $R_{\text{ЮЗ}}$ ,  $R_{\text{З}}$  и  $R_{\text{СЗ}}$ . В большинстве случаев достаточно сделать расчет только для одного румба — перпендикулярного оси бассейна. Более точные оценки требуют вычисления среднего значения  $\bar{R}$ . Для этого следует иметь в виду, что  $R_{\text{Ю}} = -R_{\text{С}}$ ,  $R_{\text{ЮЗ}} = -R_{\text{СВ}}$ ,  $R_{\text{З}} = -R_{\text{В}}$ ,  $R_{\text{СЗ}} = -R_{\text{ЮВ}}$ . Затем следует определить повторяемость  $v_j$  % направлений ветра восьми главных румбов (во время выпадения осадков) и  $\bar{R}$  по формуле

$$\bar{R} = \sum v_j R_j . \quad (22)$$

Здесь  $j$  — номер румба.

Если площадь бассейна  $S$  определена планиметрированием, то можно не измерять длину  $D_i$  каждой прямой на карте, а вычислять  $\bar{D}$  из очевидного соотношения

$$\bar{D} = \frac{S}{n \Delta \xi} , \quad (23)$$

где  $n$  — общее число полос шириной  $\Delta \xi$  каждая, полученное для данного румба (учитывая и случаи, когда одна и та же полоса пересекает бассейн несколько раз).

В нашем примере (рис. 5 и табл. 3),  $R_{\text{Ю}} = 18,9\%$ ,  $R_{\text{ЮЗ}} = 5,8\%$ ,  $R_{\text{З}} = -8,0\%$ ,  $R_{\text{СЗ}} = -17,6\%$ . Приняв в качестве примера следующие значения повторяемостей направлений ветра  $v_{\text{Ю}} = 30\%$ ,  $v_{\text{ЮЗ}} = 28\%$ ,  $v_{\text{З}} = 15\%$ ,  $v_{\text{СЗ}} = 8\%$ ,  $v_{\text{С}} = 3\%$ ,  $v_{\text{СВ}} = 6\%$ ,  $v_{\text{В}} = 4\%$ ,  $v_{\text{ЮВ}} = 6\%$ , получим

$$\begin{aligned} \bar{R} = & 0,30 \cdot 18,9 + 0,28 \cdot 5,8 + 0,15 \cdot (-8,0) + 0,08 \cdot (-17,6) + \\ & + 0,03 \cdot (-18,9) + 0,06 \cdot (-5,8) + 0,04 \cdot 8,0 + 0,06 \cdot 17,6 = 5,1\% . \end{aligned}$$

Подобные расчеты стоит провести для горных бассейнов с целью оценить, велика ли ошибка  $\delta X_{\Gamma}$  среднего по бассейну слоя осадков при определении его по данным обычной сети осадкомерных пунктов. Если ошибка  $\delta X_{\Gamma}$  велика, то следует произвести уточнение расчета осадков.

Покажем, что ошибка  $\delta X_{\Gamma}$  может оказаться большой только для бассейнов относительно малых размеров. В природе лишь изредка встречаются водосборы, у которых  $\bar{H} - \bar{h}$  в каком-либо направлении превышает 1 км. Если считать, что ошибкой  $\delta X_{\Gamma}$  можно пренебречь, когда она меньше 5%, то для бассейнов со средним поперечным размером вдоль направления ветра  $D = 20$  км с ошибками  $\delta X_{\Gamma}$  уже можно не считать.

Таким образом, для воднобалансовых расчетов уточнять величины осадков, получаемые обычной сетью с вертикально стоящими

дождемерами, имеет смысл лишь на водосборах сравнительно малых поперечных размеров — до 20 км. Учитывая, что осадки выпадают при ветрах разных направлений и скоростей, эти оценки следует еще уменьшить по крайней мере в 1,5—2 раза, когда речь идет о водных балансах за месяц или сезон.

### Различие в увлажнении противоположных склонов долин

При расчете интенсивности дождевой эрозии склонов в ряде случаев, когда важно уточнить влагообеспеченность посевов на разных склонах в горной местности, требуется знать, насколько количество осадков, выпадающих на один склон долины, больше их количества на другом склоне и насколько оно отличается от количества осадков, измеренного обычным осадкомером. Этому вопросу посвящена работа [4]. В настоящей статье рассмотрим его в несколько более общем виде.

Направим ось  $\eta$  неподвижной системы координат горизонтально и параллельно оси долины вниз по ней, ось  $\xi$  — также горизонтально и перпендикулярно оси долины в сторону ее склона, а ось  $\zeta$  — вертикально вверх.

Пусть левый и правый склоны долины имеют одинаковый уклон и расположены симметрично относительно ее оси, т. е. ориентация одного из них характеризуется углом  $B$ , а другого — углом  $-B$ . Тогда, по уравнению (7) для левого и правого склонов получаются разные величины гидрологических осадков, которые обозначим через  $x_{г,л}$  и  $x_{г,п}$  соответственно. Разность  $\Delta x_r = x_{г,л} - x_{г,п}$  выразится соотношением

$$\Delta x_r = 2x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin B \sin C. \quad (24)$$

При некотором направлении траекторий эта разность минимальна и равна  $\min(\Delta x_r)$ , а при некотором направлении она максимальна и равна  $\max(\Delta x_r)$ . Ясно, что

$$\min(\Delta x_r) = 0 \text{ при } C_{\min} = 0 \text{ или } \pi, \quad (25)$$

т. е. при ориентации траекторий капель вниз или вверх по долине. Максимум определяется, как обычно, из условия равенства нулю первой производной  $\Delta x_r$  по  $C$ :

$$\max(\Delta x_r) = \pm 2x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta \sin B \text{ при } C_{\max} = \pm \frac{\pi}{2}, \quad (26)$$

т. е. при полете капель перпендикулярно оси долины (знак плюс (+), когда левый склон наветренный, а знак минус (—), когда наветренным является правый склон).

Аналогично доказывается, что величина  $\max(\Delta x_r)$  наибольшая, когда  $B = \pm \frac{\pi}{2}$ , т. е. когда склоны параллельны оси долины.

Таблица 4

Максимальная разность в количествах осадков, получаемых левым и правым склонами долины (% к измеренным обычным дождемером) в зависимости от  $\alpha$ ,  $B$  и  $\beta$

| $\beta^\circ$      | $\alpha^\circ$ |     |     |      |      |      | $\alpha^\circ$ |     |    |     |     |     |
|--------------------|----------------|-----|-----|------|------|------|----------------|-----|----|-----|-----|-----|
|                    | 5              | 10  | 20  | 30   | 40   | 45   | 5              | 10  | 20 | 30  | 40  | 45  |
| $B = \pm 5^\circ$  |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 0,1            | 0,3 | 0,6 | 0,9  | 1,3  | 1,5  | 0,3            | 0,5 | 1  | 2   | 3   | 3   |
| 10                 | 0,3            | 0,5 | 1,1 | 1,8  | 2,6  | 3,1  | 0,5            | 1   | 2  | 4   | 5   | 6   |
| 20                 | 0,6            | 1,1 | 2,3 | 3,7  | 5,3  | 6,4  | 1              | 2   | 5  | 7   | 11  | 13  |
| 30                 | 0,9            | 1,8 | 3,7 | 5,8  | 8,4  | 10,0 | 2              | 4   | 7  | 12  | 17  | 20  |
| 40                 | 1,3            | 2,6 | 5,3 | 8,4  | 12,1 | 14,4 | 3              | 5   | 11 | 17  | 24  | 29  |
| 45                 | 1,5            | 3,1 | 6,4 | 10,0 | 14,5 | 17,4 | 3              | 6   | 13 | 20  | 29  | 35  |
| $B = \pm 20^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 0,5            | 1   | 2   | 3    | 5    | 6    | 1              | 2   | 3  | 5   | 7   | 9   |
| 10                 | 1              | 2   | 4   | 7    | 10   | 12   | 2              | 3   | 6  | 10  | 15  | 18  |
| 20                 | 2              | 4   | 9   | 14   | 21   | 25   | 3              | 6   | 13 | 21  | 31  | 36  |
| 30                 | 3              | 7   | 14  | 23   | 33   | 39   | 5              | 10  | 21 | 33  | 48  | 58  |
| 40                 | 5              | 10  | 21  | 33   | 48   | 57   | 7              | 15  | 30 | 48  | 70  | 84  |
| 45                 | 6              | 12  | 25  | 39   | 57   | 68   | 9              | 18  | 36 | 58  | 84  | 100 |
| $B = \pm 40^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 1              | 2   | 4   | 6    | 9    | 11   | 1              | 2   | 4  | 7   | 10  | 12  |
| 10                 | 2              | 4   | 8   | 13   | 19   | 23   | 2              | 4   | 9  | 14  | 21  | 25  |
| 20                 | 4              | 8   | 17  | 27   | 39   | 47   | 5              | 9   | 19 | 30  | 43  | 52  |
| 30                 | 7              | 13  | 27  | 43   | 62   | 74   | 7              | 14  | 30 | 47  | 68  | 82  |
| 40                 | 10             | 19  | 39  | 62   | 90   | 107  | 10             | 21  | 43 | 68  | 100 | 119 |
| 45                 | 11             | 23  | 47  | 74   | 108  | 129  | 12             | 25  | 52 | 82  | 119 | 141 |
| $B = \pm 50^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 1              | 2   | 5   | 8    | 11   | 13   | 1              | 3   | 6  | 9   | 13  | 15  |
| 10                 | 2              | 5   | 10  | 15   | 23   | 27   | 3              | 5   | 11 | 17  | 26  | 30  |
| 20                 | 5              | 10  | 20  | 32   | 47   | 57   | 6              | 11  | 23 | 36  | 53  | 63  |
| 30                 | 8              | 16  | 32  | 51   | 74   | 88   | 9              | 18  | 36 | 58  | 84  | 100 |
| 40                 | 11             | 23  | 47  | 74   | 108  | 128  | 13             | 26  | 53 | 84  | 122 | 145 |
| 45                 | 13             | 27  | 57  | 88   | 128  | 153  | 15             | 30  | 63 | 100 | 145 | 173 |
| $B = \pm 70^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 2              | 3   | 6   | 10   | 14   | 16   | 2              | 3   | 6  | 10  | 14  | 17  |
| 10                 | 3              | 6   | 12  | 19   | 28   | 33   | 3              | 6   | 13 | 21  | 29  | 35  |
| 20                 | 6              | 12  | 25  | 40   | 58   | 68   | 6              | 13  | 26 | 41  | 60  | 72  |
| 30                 | 10             | 19  | 40  | 63   | 91   | 108  | 10             | 20  | 41 | 66  | 95  | 104 |
| 40                 | 14             | 28  | 57  | 100  | 132  | 158  | 15             | 29  | 60 | 96  | 139 | 165 |
| 45                 | 16             | 33  | 63  | 108  | 158  | 188  | 17             | 35  | 72 | 104 | 165 | 197 |
| $B = \pm 85^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 2              | 3   | 6   | 10   | 15   | 17   | 2              | 3   | 6  | 10  | 15  | 18  |
| 10                 | 3              | 6   | 13  | 20   | 29   | 35   | 3              | 6   | 13 | 20  | 30  | 35  |
| 20                 | 6              | 13  | 26  | 42   | 61   | 72   | 6              | 13  | 26 | 42  | 61  | 73  |
| 30                 | 10             | 20  | 42  | 66   | 96   | 105  | 10             | 20  | 42 | 67  | 97  | 116 |
| 40                 | 15             | 29  | 61  | 96   | 140  | 167  | 15             | 30  | 61 | 97  | 141 | 168 |
| 45                 | 17             | 35  | 72  | 105  | 167  | 199  | 18             | 35  | 73 | 116 | 168 | 200 |
| $B = \pm 90^\circ$ |                |     |     |      |      |      |                |     |    |     |     |     |
| 5                  | 2              | 3   | 6   | 10   | 15   | 17   | 2              | 3   | 6  | 10  | 15  | 18  |
| 10                 | 3              | 6   | 13  | 20   | 29   | 35   | 3              | 6   | 13 | 20  | 30  | 35  |
| 20                 | 6              | 13  | 26  | 42   | 61   | 72   | 6              | 13  | 26 | 42  | 61  | 73  |
| 30                 | 10             | 20  | 42  | 66   | 96   | 105  | 10             | 20  | 42 | 67  | 97  | 116 |
| 40                 | 15             | 29  | 61  | 96   | 140  | 167  | 15             | 30  | 61 | 97  | 141 | 168 |
| 45                 | 17             | 35  | 72  | 105  | 167  | 199  | 18             | 35  | 73 | 116 | 168 | 200 |

Результаты расчета величины  $\frac{\max(\Delta x_T)}{x_T} \cdot 100\%$  при разных углах наклона  $\beta$  траекторий дождевых капель в пределах  $5-45^\circ$  и различных уклонах  $\alpha$  склонов в пределах  $5-45^\circ$  для склонов разной ориентации относительно оси долины приведены в табл. 4. Данные таблицы свидетельствуют о возможности существенной разницы в увлажнении противоположных склонов долины. Согласно работе [2], можно грубо принять скорость равновесного падения капель при морозящих осадках равной  $1-1,5$  м/сек., при обложных  $1,5-6$  м/сек. и при ливневых  $6-8,5$  м/сек. Считая, что в горизонтальном направлении капля движется со скоростью ветра  $u$ , получим значения скорости ветра, соответствующие разным наклонам траектории (табл. 5). Из таблицы видно, что даже при ливневых осадках большой наклон траекторий падения капель наблюдается далеко не редко, поскольку скорость ветра  $3-7$  м/сек. во время дождя наблюдается часто. При обложных же осадках и тем более при морозящих уже при скорости ветра  $1-3$  м/сек. углы наклона дождя будут большими и соответственно склоны разной ориентации будут получать существенно различное количество осадков. Так, при сравнительно слабом ветре ( $2-3$  м/сек.), направленном поперек долины, и почти параллельных (противоположно ориентированных) склонах с уклоном  $10-20^\circ$  различие в их увлажнении составляет  $13-26\%$  даже при ливневых осадках, при обложных достигает  $20-42\%$ , а при морозящих превышает  $50-80\%$ . Для широко расходящейся долины со склонами, ориентированными под углом  $90^\circ$  друг к другу (под углом  $45^\circ$  к оси долины), соответствующие оценки меньше, но составляют все же  $9-19$ ,  $14-30$  и  $30-60\%$ . Разница между увлажнением каждого из склонов и показаниями обычных дождемеров составляет половину этих оценок, оставаясь настолько существенной, что пренебрегать ею при составлении водных балансов склонов или при расчетах увлажнения в сельскохозяйственных целях нельзя.

Таблица 5

Скорости ветра (м/сек.), соответствующие разным наклонам траектории падения дождевых капель

| $\beta^\circ$ | Осадки    |          |          |
|---------------|-----------|----------|----------|
|               | морозящие | обложные | ливневые |
| 5             | 0,1       | 0,1—0,5  | 0,5—0,8  |
| 10            | 0,2—0,3   | 0,3—1,1  | 1,1—1,5  |
| 20            | 0,4—0,5   | 0,5—2,1  | 2,1—3,1  |
| 30            | 0,6—0,9   | 0,9—3,5  | 3,5—4,9  |
| 40            | 0,8—1,3   | 1,3—5,0  | 5,0—7,1  |
| 45            | 1,0—1,5   | 1,5—6,0  | 6,0—8,5  |

При ветре, не перпендикулярном оси долины ( $C \neq \pm \frac{\pi}{2}$ ), раз-

личия будут меньше указанных в табл. 4. Числа этой таблицы, согласно формуле (24), нужно в этом случае умножить на  $\sin C$ .

Поскольку в нашем примере взяты склоны, симметричные относительно оси долины, количество осадков, получаемое одним из них, меньше  $x$  на столько же, на сколько оно больше  $x$  у другого склона. Если склоны не симметричны и не одинакового уклона, то расчет для каждого из них нужно вести по формуле (7) в отдельности.

Итак, проведенный анализ погрешностей измерения осадков в горной местности свидетельствует о том, что при выраженном рельефе для решения ряда практических задач необходимо знать склоновые или гидрологические осадки. Из таких задач главные — воднобалансовые расчеты для уточнения гидрологических прогнозов и расчеты для определения условий возделывания сельскохозяйственных культур, исследования эрозии, определения условий образования селей и др.

В заключение подчеркнем, что полученные численные характеристики справедливы лишь в той мере, в какой оправдывается исходное условие о прямолинейности и параллельности траекторий капель в каждый данный момент над всей площадью рассматриваемых бассейнов. На самом деле это условие никогда не выполняется строго. По-видимому, полученными количественными оценками практически можно пользоваться в предгорьях и местностях со сглаженными, хорошо обтекаемыми формами рельефа. В высокогорье же нужно учитывать степень отклонения траекторий реального поля от прямолинейных и параллельных траекторий осадков, и это отклонение определит степень репрезентативности пунктов наблюдений за осадками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соседов И. С. Исследование баланса снеговой влаги на горных склонах. Алма-Ата, 1967.
2. Шишкин Н. С. Размеры капель дождя. Природа, № 10, 1954.
3. Ноеск Е. Rapport du comité pour la mesure des précipitations Union Géodésique et Géophysique internationale. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique. Assemblée Générale de Bruxelles, 1951, t. III.
4. Junhaus H. Der Niederschlag auf geneigte Flächen. Angew. Meteorol., B. 5, No. 7—8, 1967.
5. Serra L. Interprétation des mesures pluviométriques. Lois de la pluviosité. Union Géodésique et Géophysique Internationale. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique. Assemblée Générale de Bruxelles, 1951, t. III.

## К ПОСТАНОВКЕ НАБЛЮДЕНИЙ НАД ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

Необходимость всестороннего изучения гололедно-изморозевых явлений на территории Советского Союза вызывается, с одной стороны, наличием некоторых пробелов в области теории обледенения и, с другой стороны, потребностью народнохозяйственных организаций в получении сведений о фактических гололедно-ветровых нагрузках на разных высотах в различных климатических районах.

Сейчас можно говорить о массовости гололедных наблюдений. Однако отдельные районы СССР в гололедном отношении освещаются еще недостаточно полно. Даже наиболее освещенная Европейская территория СССР имеет белые пятна на возвышенных местах, на водоразделах, где гололедно-изморозевые явления наиболее значительны. Наименее освещены северные и горные районы, а также Азиатская территория СССР. На Кавказе значительная часть станций расположена ниже 700 м, в Крыму только ст. Ай-Петри является высокогорной, слабо освещены горы Урала и Карпаты.

На сети гидрометстанций СССР наблюдения над обледенением проводятся на сменных и постоянных проводах гололедного станка, расположенных в меридиональном и широтном направлениях на высотах 1,9 и 2,2 м над поверхностью земли. Следует отметить тот положительный факт, что наблюдения на всей сети станций проводятся по единой методике, обеспечивая сравнимость между собой получаемых данных. Что касается постов, то на большинстве из них проводятся лишь визуальные наблюдения над видом отложения. Это существенный недостаток организации наблюдений над обледенением, так как, учитывая локальность гололедно-изморозевых явлений, значительно более ярко выраженную, чем локальность осадков, для полного освещения каждого района в гололедном отношении необходимо создать более густую инструментальную сеть с полной программой наблюдений.

Основным недостатком существующей методики инструментальных наблюдений над обледенением является несовершенство самого гололедного станка: малая высота подвески проводов, жесткость их крепления и недостаточная длина провода, на котором наблюдается обледенение. Данные, полученные в результате наблюдений по гололедному станку, могут только очень

приблизительно характеризовать действительные величины обледенения на проводах линий электропередачи и связи в естественных условиях, т. е. на проводах, свободно подвешенных на высоте 10 м и более над землей.

Продолжительность случаев обледенения изменяется в очень широких пределах, от нескольких часов до нескольких суток. На протяжении этого периода стадии обледенения могут чередоваться: стадия нарастания может смениться стадией сохранения отложения, затем могут снова возобновляться. Здесь возникает одна особенность, которую необходимо учитывать при производстве наблюдений. Согласно существующей методике вес отложения определяется по съемному проводу, на котором одновременно измеряются и размеры отложения (диаметр и толщина). Определение веса производится в том случае, если размеры отложения на постоянном проводе достигли установленных значений, а именно: 5 мм для гололеда<sup>1</sup>, 10 мм для зернистой изморози и снеговидного отложения мокрого снега, 15 мм для кристаллической изморози.

При продолжительных обледенениях, когда стадия нарастания возобновляется несколько раз, вес отложения также определяется неоднократно. И общий вес отложения и размеры его получаются в результате суммирования результатов отдельных измерений в соответствии с рекомендованной методикой. Такая рекомендация, совершенно логичная на первый взгляд, не учитывает особенностей процесса образования льда на проводах различного диаметра. Различие диаметров проводов, на которых происходит осаждение переохлажденных капель, сказывается и на приросте размера отложения и его веса. Поэтому нельзя отождествлять процесс роста отложений на сменном проводе, диаметр которого для начала каждой стадии нарастания равен 5 мм, и на постоянном проводе, диаметр которого, учитывая уже имеющиеся отложения льда или снега, значительно больше 5 мм.

Некоторую роль здесь должны играть и температурные различия проводов, однако можно допустить, что эти различия будут сказываться лишь в первый момент, пока сменный провод не покроется коркой льда, после чего температурные условия проводов должны сравняться.

Размеры отложений, полученные как результат суммирования при многообразных измерениях, могут превышать максимальный размер отложения на постоянном проводе в 4—5 раз. Нечто подобное наблюдается и при определении окончательного веса отложения как суммы отдельных измерений на сменном проводе — просуммированная величина больше веса отложения на постоянном проводе в 1,5—2,0 раза. Указанные соотношения справедливы не только для гололеда, но и для других видов плотных отложений (изморозь с гололедом, зернистая изморозь и др.).

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что каждое определение веса на съемном проводе при продолжительных

<sup>1</sup> Все размеры даны без учета диаметра провода.

обледенения может служить лишь для получения плотности отложения, а суммарный вес для последующего обобщения должен определяться по максимальным размерам отложения на постоянном проводе и по значению плотности отложения, полученной из ряда измерений на съемном проводе. Если отложение простое (например, чистый гололед), то может быть определена средняя плотность из всех измерений, если же отложение сложное, то здесь необходимо послойно определять веса. Для расчетов может быть предложена следующая формула:

$$P = c\rho [DT + d(D + T)],$$

где  $P$  — искомый вес на 1 погонном метре провода в граммах,  $\rho$  — плотность отложения,  $D$  и  $T$  — диаметр и толщина отложения на постоянном проводе (за вычетом диаметра провода) в миллиметрах,  $d$  — диаметр провода (или средняя толщина отложения в случае послойного определения веса при сложном обледенении) в миллиметрах,  $c$  — коэффициент, равный 0,785.

О достижении отложением опасных значений также следует судить по измерениям на постоянных проводах. Процесс гололедообразования очень сложен по своему характеру, и трудно установить прямую зависимость между значениями метеорологических элементов и структурой и величиной отложения. Несомненно, что одним из главных факторов, от которых зависит интенсивность нарастания льда, является количество влаги, участвующей в образовании отложения. Это количество влаги определяется влагосодержанием воздушного потока, скоростью его перемещения относительно предмета, на котором происходит осаждение осадка, размерами предмета, а также углом встречи потока с поверхностью предмета. В общем виде вес отложения, образующегося на единице поверхности предмета, может быть выражен следующим образом:

$$P = f(c, w, u, t, \beta),$$

где  $w$  — содержание влаги в воздухе,  $u$  — скорость невозмущенного потока,  $\beta$  — угол встречи потока с поверхностью тела,  $t$  — время,  $c$  — коэффициент, характеризующий аэродинамические свойства предмета.

В настоящее время проводятся исследования по установлению зависимости между этими величинами, пригодной для количественных расчетов. Установление такой зависимости позволит производить расчеты интенсивности обледенения проводов и других предметов, расположенных на различных высотах. Необходимость разработки методики для расчета величины и веса отложений на различных высотах совершенно очевидна. Широкий объем запросов, поступающих от народнохозяйственных организаций, свидетельствует о важности, которую приобрел вопрос измерения гололедно-изморозевых отложений. Железнодорожный и автомобильный транспорт, авиация, энергетика, строительство, в особенности возведение высотных сооружений, предъявляют свои

специфические требования к информации о гололедно-изморозевых явлениях. Количественные оценки гололедных и гололедно-ветровых нагрузок в слое атмосферы до нескольких сот метров, их распределение по высоте и изменение отложений во времени, оценка физико-механических свойств отложений — вот неполный перечень тех сведений, которые нужны для учета влияния гололедных отложений при эксплуатации техники.

Наблюдения над обледенением и сопутствующими метеорологическими явлениями на различных высотах, организуемые на телевизионных мачтах, вышках и других высотных сооружениях, позволяют получить необходимый материал для анализа и последующего решения вопросов, связанных с расчетом нагрузок от гололедно-изморозевых отложений, их периодичностью и устойчивостью, условиями нарастания и разрушения. Эти материалы необходимы как для уточнения нормативов при проектировании и строительстве промышленных, гражданских и энергетических сооружений, так и для прогнозирования и разработки методов воздействия на отложения с целью их предотвращения или разрушения. В настоящее время начаты работы по уточнению определения гололедных и ветровых нагрузок на воздушные линии электропередач в районах с гололедностью III и выше в пунктах, наиболее подверженных гололедообразованию. Цель этих специальных наблюдений заключается в получении данных об обледенении проводов линий электропередачи и уточнении нагрузок на линии, вызванных влиянием ветра и гололеда на фактической высоте подвески проводов. Кроме того, эти наблюдения необходимы для изучения динамических нагрузок на провода, обусловливаемых влиянием порывистого ветра, и для уточнения методики расчета наиболее выгодных параметров линии (длина пролета, конструкция проводов и т. д.). Наконец, материалы наблюдений, проводящихся на рабочих уровнях воздушных линий, послужат основанием для уточнения карты гололедного районирования территории Советского Союза в зависимости от типов рельефа и климатических особенностей.

Для наблюдений над обледенением проводов на рабочих уровнях воздушных линий вблизи метеорологических станций устанавливаются два опытных пролета с направлением проводов север — юг и восток — запад. Расстояние между опорами (длина пролета) 150—160 м, высота подвеса проводов на опорах 11,5 м. В пролете провод на одной опоре закреплен наглухо, на второй опоре пропущен через блок и с помощью лебедки может опускаться.

Опытные пролеты должны быть максимально приближены к метеоплощадке для последующего сопоставления данных наблюдений с материалами стандартных измерений параметров обледенения на гололедном станке. Кроме того, такое расположение опытных пролетов дает возможность производить наблюдения над сопутствующими обледенению атмосферными явлениями и определять значения метеорологических элементов (ветра, температуры, влажности) в моменты, наиболее характерные для данного случая

обледенения. Если в непосредственной близости от метеоплощадки (в радиусе 100—200 м) установить опытные пролеты не представляется возможным, то необходимо их отнести на большее расстояние и туда же перенести гололедный станок, наблюдения по которому следует производить одновременно с наблюдениями на опытном пролете.

Материалы этих наблюдений, проводящихся в различных по степени гололедности районах, представляют значительную ценность при решении как практических, так и теоретических вопросов, связанных с обледенением. Образование отложений льда разных видов на проводах гололедного станка и на проводах линий электропередачи происходит неодинаково вследствие различий высоты подвески проводов, особенностей крепления провода ЛЭП, который имеет возможность закручиваться по продольной оси при неравномерном осаджении осадка на проводе, выравнивая отложение. Это вызывает различие не только в размерах осадка, но и в его плотности, интенсивности образования и продолжительности явления.

Мы видим, что методика наблюдений над обледенением, принятая на гидрометеорологической сети, далеко не совершенна. Необходимо непрерывная запись процесса обледенения проводов.

Существует несколько конструкций гололедографов, некоторые из них были приняты для внедрения на сеть и для исследовательских целей. К первым относится гололедограф М-28, ко вторым — дистанционный электрический гололедограф. Однако ни тот, ни другой гололедограф не обеспечивал требований к получению основных характеристик процесса гололедообразования и прежде всего необходимой точности.

Следует несколько остановиться на недостатках гололедографа М-28, общих и для ряда других конструкций, предлагаемых различными авторами. Вертикальное положение стержня с намерзающим на нем осадком (вес последнего регистрируется на ленте) не отвечает естественным условиям, в которых происходит отложение льда на горизонтальном проводе. Он не может обеспечить получение нужных данных при мокром снеге или дожде в гололедной ситуации. При ветре создается перекосяк вертикального стержня и возникает трение, искажающее результаты регистрации веса отложения. Применять пружинные весы, предусмотренные конструкцией, целесообразно лишь при постоянных температурах. В естественных условиях упругие свойства пружины изменяются и это также вносит дополнительную погрешность в измеряемую величину. Кинематика прибора груба, и он слабо реагирует на малое количество отложений; в то же время прибор не обеспечивает и регистрацию большего количества отложений, наблюдаемых в ряде районов СССР. Место сочленения приемника с корпусом прибора часто обледеневает, и прибор вообще не реагирует на изменение веса отложения, записывая прямую линию.

Для обеспечения надежных наблюдений над гололедом необходимо иметь простой прибор, удобный в эксплуатации, который

можно использовать как на станциях, так и на постах для организации непрерывной регистрации всего процесса обледенения.

Следует сказать еще об одной немаловажной задаче, связанной с явлением обледенения. Это наблюдение над гололедицей, т.е. над образованием льда на поверхности земли после оттепели или дождя в результате наступления внезапного похолодания. Разработка методики инструментального определения гололеда на поверхности земли представляет большой практический интерес для автомобильного транспорта и авиации.

Автоматизация измерений метеорологических элементов, проводящаяся в настоящее время, предполагает разработку соответствующих датчиков для определения параметров обледенения.

Успешное разрешение проблемы всестороннего изучения гололедно-изморозевых явлений требует широкого комплексного исследования с привлечением технически совершенных методов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по наблюдениям над обледенением проводов на рабочих уровнях воздушных линий электропередачи. Гидрометеиздат, 1970.
2. Базилевич В. В. Влияние микроструктуры тумана на обледенение проводов. Труды ГГО, вып. 3, 1947.
3. Смирнов С. А. Определение характеристик отложений при продолжительных случаях обледенения. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
4. Смирнов С. А. Методика гололедных наблюдений на сети гидрометеорологических станций и постов. ГУГМС. Труды Всесоюзного совещания по гололеду, 1970.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 3, часть 1, 1969.

## ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ ОСАДКОМЕРА НА ВЫСОТЕ 10 м НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Как известно [1, 2, 3], атмосферные осадки измеряются существующими осадкомерами неточно. Одна из существенных ошибок систематического характера вызвана надуванием «ложных» осадков с поверхности снежного покрова в осадкомер, проще говоря, наметанием в прибор снега, поднятого ветром с поверхности земли [4].

Для изучения зависимости количества наметенного снега от скорости ветра во время метели и структуры снежного покрова необходимо установить аэродинамически подобные осадкомеры на разных уровнях от поверхности земли, в том числе и на высотах, на которые взметенный ветром снег не поднимается — предположительно 6—10 м, а, возможно, и выше. Даже если верхняя граница метелевого переноса не будет достигнута, экспериментальное измерение осадков на нескольких существенно различающихся уровнях в одном пункте даст возможность найти градиент плотности метелевого переноса при различных скоростях ветра, т. е. в конечном счете решить поставленную задачу.

Главной трудностью в проведении описанных экспериментов оказалась установка осадкомеров на большой высоте.

Попытки установить осадкомер высоко над поверхностью земли предпринимаются не впервые. В зарубежных опытах [5] прибор ставили на крышах зданий, на шпилях соборов и других сооружений, т. е. в зоне нарушенной структуры ветрового потока, что заранее предопределяло неудачу. В более поздних отечественных опытах [6, 7] строились специальные ажурные вышки из бревен (высотой 12 м в опытах Г. И. Орлова в Павловске и 27 м в опытах В. Д. Третьякова в Косулино) с площадкой наверху и лестницей для подъема наблюдателя к прибору. Эти сооружения очень дорогие, а использовать их было небезопасно, так как наблюдателю приходилось подниматься на большую высоту по вертикальной ажурной лестнице при сильном ветре, морозе и метели. Несмотря на специально принятые меры, полностью избежать нарушения структуры ветрового потока на этих вышках все же не удавалось. Чтобы исключить искажения поля ветра самой вышкой, осадкомеры нужно ставить на высоких столбах или мачтах.

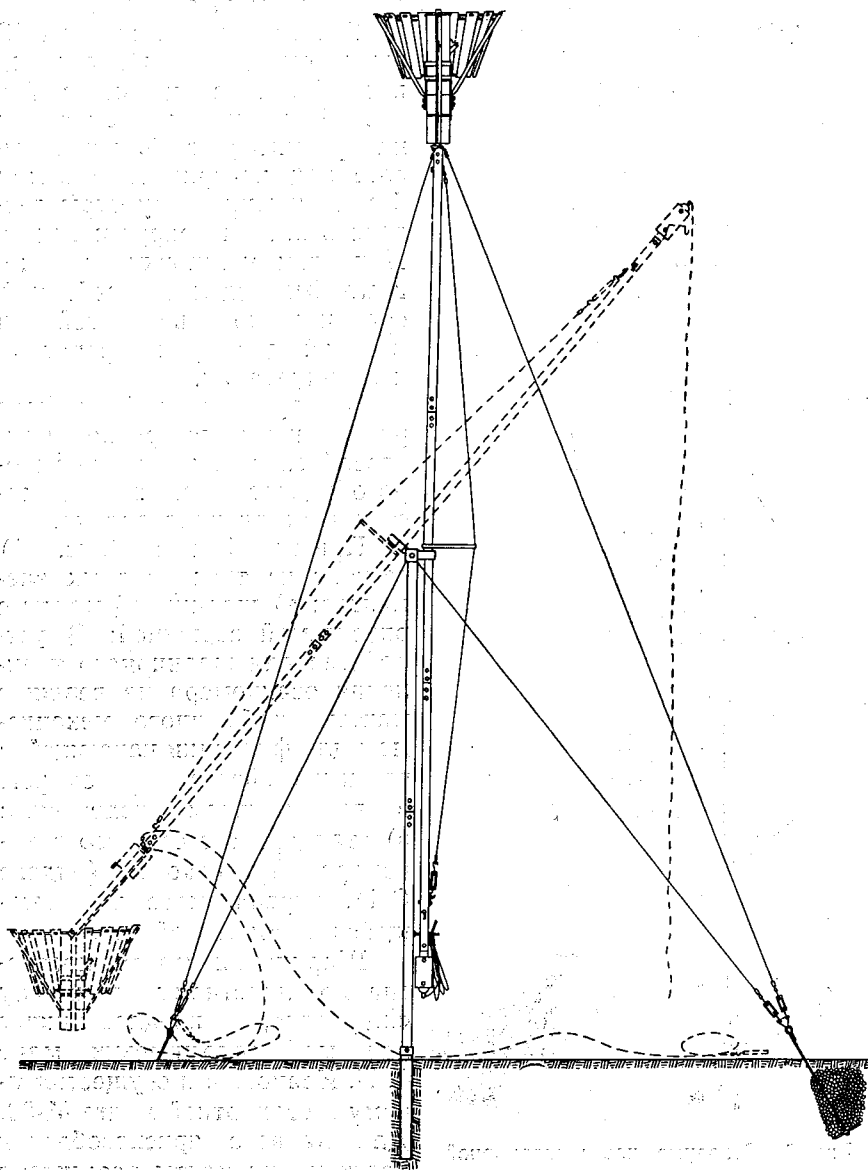


Рис. 1. Мачта с установленным на ней осадкомером.

Пунктиром показано положение опускающейся части мачты и осадкомера во время смены осадкомерного сосуда.

Вспомогательная часть мачты, которая используется для того, чтобы опустить осадкомерный сосуд, имеет вид, показанный на рис. 1. Эта часть мачты имеет вид, показанный на рис. 1. Эта часть мачты имеет вид, показанный на рис. 1.

Осуществить такую установку до сих пор не удавалось из-за трудностей подъема прибора к вершине мачты и опускания его вниз

для измерения осадков.

В методическом отделе ГГО была выполнена инженерная проработка с целью найти способ установки осадкомера на сравнительно большой высоте над поверхностью земли без нарушения структуры ветрового потока вокруг прибора. При этом установку необходимо было сделать разборной, сравнительно недорогой и удобной для транспортировки и эксплуатации.

В результате работы было рассчитано и построено приспособление, с помощью которого удовлетворительно решается поставленная задача.

Приспособление (рис. 1) состоит из трех главных элементов: а) шарнирной мачты с опускаемой вершиной; б) устройства для шарнирного крепления осадкомера на вершине мачты, снабженного механизмом для фиксации качающейся части устройства с осадкомером в вертикальном положении; в) стандартного сетевого осадкомера Третьякова (индекс О-1), укрепляемого в качающейся части устройства.

Шарнирная мачта построена по известному принципу «журавля», предложенному для метеорологических мачт А. П. Ивановым и осуществленному в стандартной мачте М-82. Для данного приспособления конструкция мачты рассчитана заново, с учетом большого

веса осадкомера со всеми устройствами на вершине мачты и двукратного запаса прочности при скоростном напоре ветра на площадь поперечного сечения осадкомера, при скорости ветра 25 м/сек. В принципе мачту можно рассчитать для любой

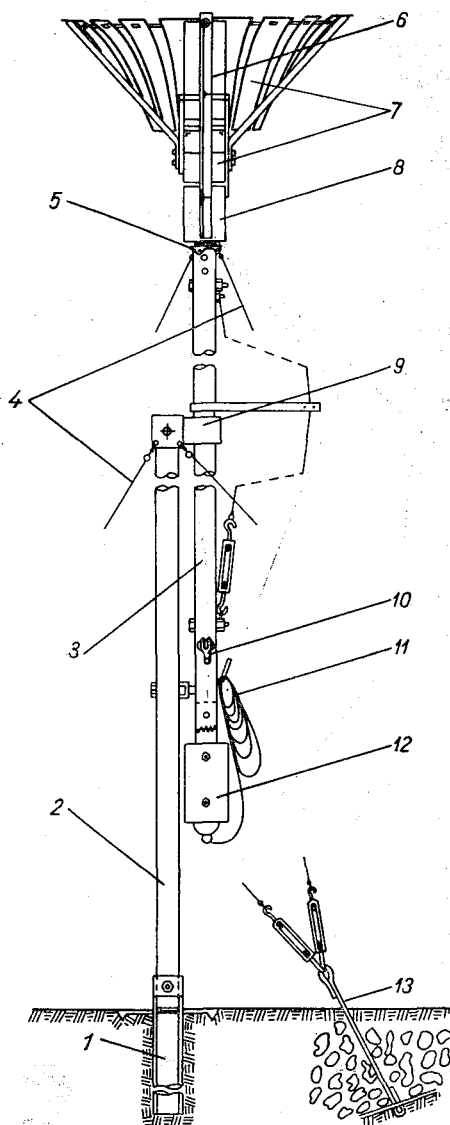


Рис. 2. Основные части шарнирной мачты для установки осадкомера.

скорости ветра, но из-за экономии и малого срока эксплуатации было решено ограничиться указанной выше величиной.

Шарнирная мачта состоит из следующих основных частей (рис. 2): неподвижной части мачты 2, основания 1 и якорей 13, опускающейся части 3 мачты, шарнира 9 опускающейся мачты, оголовка-трубы 5 для крепления опорной части 8 устройства для

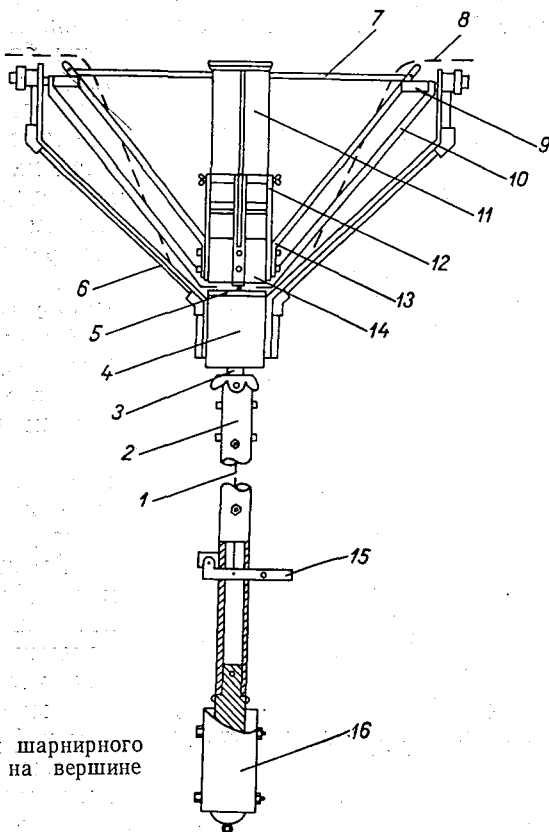


Рис. 3. Устройство для шарнирного крепления осадкомера на вершине мачты.

шарнирного крепления осадкомера 6, качающейся части 7 устройства для шарнирного крепления осадкомера 6, противовеса 12 в нижней части опускающейся мачты, крепежных тросов 4 мачты, рукоятки троса собачки 10 и болта-штифта 11.

Устройство для шарнирного крепления осадкомера на вершине мачты конструировалось специально для данной задачи и осуществлено таким образом, что при опускании и подъеме мачты осадкомер находится в вертикальном положении, благодаря чему собранные осадки не высыпаются и не выливаются.

Устройство для шарнирного крепления осадкомера состоит из опорной и качающейся частей (рис. 3). Опорная часть (крепежный стакан 4) соединяется с помощью оголовка 3 с верхним

концом опускающейся части 2 мачты. Внутри трубы проходит трос собачки 1. Верхний конец оголовка приварен к крышке 5 крепежного стакана 4, на которой закрепляется крепежный стакан с опорной и качающейся частями. К крепежному стакану привариваются два фигурных кронштейна 6. В верхних отверстиях кронштейнов с помощью пальцев 9 шарнирно удерживается качающаяся часть.

Основной деталью качающейся части устройства является противовес 14 осадкомера с зубом защелки. К противовесу прикреплены болтами четыре укосины защиты осадкомера 13 и четыре ножки тагана 12. Жесткое крепление защиты осадкомера на противовесе обеспечивается двумя дополнительными тягами 10. Укосины защиты завариваются в пазах пальцев 9, а дополнительные тяги 10 — в середине пальцев.

Стандартный сетевой осадкомер Третьякова (индекс О-1) взят в модификации с 4 укосинами и 16 пластинами защиты. Более поздняя модификация с 3 укосинами и 15 пластинами для установки на мачте не годится.

Таган осадкомера 12 и нижние концы укосин защиты 13 прикреплены к противовесу 14 качающейся части устройства так, что при нормальном зазоре между противовесом с зубом и фиксирующим его механизмом на крышке крепежного стакана 5 верхний край

установленного в таган сосуда осадкомера 11 находится в одной плоскости с отогнутыми краями планок защиты 8, укрепленных на кольцевом прутке 7. Таган снабжен зажимами с барашками для более прочного крепления приемного сосуда осадкомера в рабочем положении.

В нижней части рисунка показано крепление рукоятки 15 управления собачкой и противовеса 16 опускающейся части мачты.

Механизм, фиксирующий качающуюся часть устройства, размещен внутри крепежного стакана 4 на внутренней стороне его крышки 7 (рис. 4). Механизм состоит из стойки 11, собачки 5 с зубом 10, пружины 6 и троса 13. Трос одним концом прикрепляется к собачке, затем продевается через всю трубу опускающейся части мачты 1 и нижним концом прикрепляется к рукоятке управления тросом собачки. Собачка размещается в прорези 12

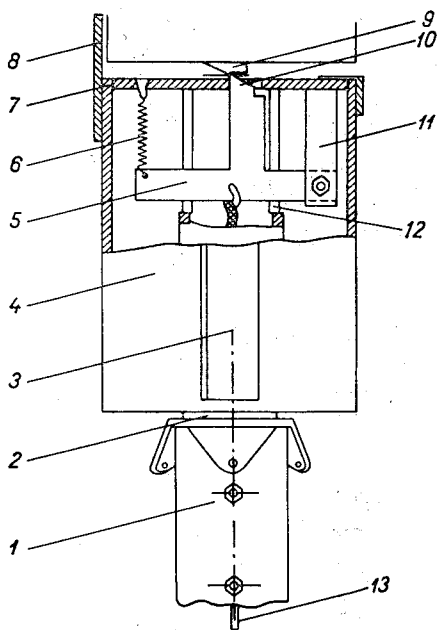


Рис. 4. Крепежный стакан с механизмом фиксации качающейся части устройства.

оголовка мачты 2. Нажимая на рукоятку троса собачки, мы тем самым опускаем собачку. Зуб собачки 10 выходит из зацепления с зубом защелки 9, и качающаяся часть получает свободное движение вперед. Движение качающейся части назад препятствует упор противовеса 8. К боковой стенке крепежного стакана приварен фигурный кронштейн 3, удерживающий качающуюся часть.

Противовес мачты 12 (рис. 2) рассчитан так, чтобы он был немного легче, чем осадкомер и устройство его шарнирного крепления на вершине мачты. При опускании прибора верхняя часть мачты должна устойчиво удерживаться внизу во время смены осадкомерных сосудов.

В поднятом положении опускающаяся часть мачты закрепляется около неподвижной с помощью болта-штифта 11 и гайки с рукоятками. Болт-штифт входит в сквозное отверстие в трубе опускающейся части мачты и закрепляется гайкой с рукоятками. Верхний конец опускающейся части мачты укрепляется тремя тросами с талрепами.

В рабочем положении на месте эксплуатации предлагаемое приспособление действует следующим образом.

1. Подъем осадкомера осуществляется после замены и вертикальной установки осадкомерного сосуда и закрепления его барашками. Наблюдатель подходит к веревке, привязанной к кольцу противовеса мачты, и плавным потягиванием веревки поднимает осадкомер наверх. При этом нужно следить, чтобы осадкомерный сосуд во время подъема оставался в вертикальном положении и чтобы тросы оттяжек вершины мачты не перепутывались. Когда до вертикального положения опускающейся части мачты остается примерно  $10^\circ$ , нижний конец мачты нужно взять рукой и надеть предназначенным для этого отверстием на фиксирующий болт (шпильку), закрепленный в неподвижной части мачты. Нижним концом мачты следует сделать небольшое толчкообразное движение, чтобы качающаяся часть устройства по инерции подалась вперед и при этом зуб защелки противовеса, нажимая на зуб собачки, утопил его. Проскочив собачку, противовес наталкивается на упор противовеса и останавливается. Движению в обратном направлении препятствует выскочивший из отверстия в крышке крепежного стакана под действием пружины зуб собачки. На фиксирующий болт (шпильку) навинчивают гайку с рукоятками и таким путем закрепляют опускающуюся часть мачты около неподвижной. Затем закрепляется снятый трос оттяжки на якоре и талрепом натягивается до тех пор, пока мачта не примет вертикальное положение.

2. Опускание осадкомера начинается с отвинчивания талрепа и снятия троса оттяжки с якоря. Затем наблюдатель подходит к основанию мачты, снимает и распускает веревку, привязанную к кольцу противовеса, отвинчивает гайку с рукоятками, нажимает на рукоятку троса (тем самым выводится из зацепления зуб собачки с зубом защелки) и, удерживая нижнюю опускающуюся часть мачты, рукой осторожно снимает ее с фиксирующего болта.

Необходимо убедиться, что качающаяся часть установки свободно поворачивается. Опустив рукоятку троса собачки, но удерживая противовес мачты, наблюдатель берет веревку и медленно травит ее, опуская устройство для шарнирного крепления осадкомера. Во время опускания мачты качающаяся часть устройства под влиянием тяжести противовеса поворачивается в осях кронштейнов, сохраняя все время вертикальное положение. Когда устройство опустится к земле, производится смена осадкомерных сосудов.

Описанное приспособление, получившее краткое наименование «мачта, опускающаяся для осадкомера», было в 1969 г. изготовлено экспериментально-производственными мастерскими ГГО в двух экземплярах. Один экземпляр при содействии Арктического и антарктического научно-исследовательского института был установлен на ст. Амдерма. По сообщениям приспособление успешно эксплуатировалось в течение трех месяцев, в том числе при штормовых ветрах до 30 м/сек. Во время одного из таких штормов мачта упала из-за обрыва одного из крючьев оттяжек, сделанного, как показала проверка, с отклонением от первоначального чертежа. При падении приспособление не пострадало и после замены крюка эксплуатируется вновь.

Второй изготовленный экземпляр, предназначенный для работы на Кольском полуострове, по организационным причинам еще не установлен. С чертежами разработанной конструкции можно ознакомиться в ГГО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богданова Э. Г. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков. Метеорология и гидрология, № 10, 1965.
2. Струзер Л. Р. и др. Методика корректировки многолетних норм осадков. Метеорология и гидрология, № 11, 1965.
3. Струзер Л. Р. Основные недостатки и пути улучшения методов измерения атмосферных осадков. Труды ГГО, вып. 175, 1965.
4. Струзер Л. Р. О способах учета ошибок осадкомеров, вызванных попаданием в них «ложных» осадков во время метелей. Труды ГГО, вып. 260, 1970.
5. Струзер Л. Р., Брызгин Н. Н. Методика вычисления поправок к измеренным величинам атмосферных осадков в полярных районах. Труды ГГО, вып. 260, 1970.
6. Орлов Г. И. К вопросу об измерении снежных осадков. Труды НИУ ГУГМС, сер. 1, вып. 23, 1946.
7. Третьяков В. Д. Измерение атмосферных осадков. Труды ГГО, вып. 34, 1952.
8. Brooks C. F. Need for universal standards for measuring precipitation snowfall and snowcover. Associon Intern. d'Hidrolog. Bulletin. No. 23, 1954.

СЛУЖБА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
ТЕЛЕГРАММЫ И ТЕЛЕФОНЫ  
- ОБЩЕЕ ПРАВИЛО  
КОМУСЬ-ТО ИЗ НАС  
КАКИЕ-ТО СТАТИСТИЧЕСКИЕ

## К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ РАСЧЕТОВ КОЛИЧЕСТВА ЛОЖНЫХ ОСАДКОВ, ПОПАДАЮЩИХ В ОСАДКОМЕР ВО ВРЕМЯ МЕТЕЛЕЙ

В ряде работ, краткое обобщение которых дано в статье [1], изложена система корректировки норм атмосферных осадков поправками, учитывающими три вида систематических ошибок осадкомерных приборов: ветровую, потери на смачивание осадкомерного сосуда и потери на испарение из него. Эта система неполная, так как в ней не учитывается четвертый вид ошибок — преувеличение показаний осадкомеров за счет попадания в них «ложных» осадков во время метелей. Между тем искажающее воздействие ложных осадков заметно на большей части территории СССР, а в районах с продолжительными и частыми метелями эти ошибки весьма значительны и не считаться с ними нельзя. Поэтому в работе [2] предложен способ расчета количества ложных осадков.

Снегоперенос представляет собой сложное явление, зависящее от многих физических причин. Количественной теории снегопереноса пока не создано. Поэтому в упомянутой работе используется эмпирический способ расчета интенсивности надувания в осадкомер ложных осадков. Он основан на эмпирической зависимости интенсивности снегопереноса только от одного фактора — скорости ветра. Учитывается также вид метели. В какой мере удачны выбранные эмпирические зависимости и достаточно ли ограничиться лишь одним, правда, главным фактором — скоростью ветра — заранее сказать нельзя. Поэтому всякая возможность проверить достоверность результатов повышает надежность предложенного способа расчета. Настоящая работа и преследует цель такой проверки одним из возможных способов.

Известно, что соотношение между средними многолетними сезонными суммами твердых ( $x_T$ ) и жидких ( $x_{ж}$ ) осадков — весьма стабильная характеристика, мало меняющаяся в пределах больших районов со сходным режимом осадков (т. е. с однотипным годовым ходом). Однако соотношение получается стабильным по территории лишь в том случае, когда эта характеристика рассчитывается по данным защищенных станций, т. е. станций, где зимние суммы осадков наименее искажены за счет влияния ветра и надувания. Если бы в суммы твердых осадков  $x'_T$ , измеренные на открытых и полузащищенных станциях той же территории, не входили ложные осадки (например, потому, что не было метелей), то, введя ветро-

вую поправку, можно было бы получить исправленные суммы твердых осадков  $x_t$ , отношение которых к исправленным на влияние ветра суммам жидких осадков  $x_{ж}$  было бы близко к отношению  $\frac{x_t}{x_{ж}}$ , полученному по данным защищенных станций. Поскольку, однако, измеренные суммы твердых осадков содержат часть ложных осадков  $x_{л}$ , то исправление их путем умножения на ветровой коэффициент  $K_t$  дает искаженные, преувеличенные суммы исправленных осадков:

$$x_t'' = K_t x_t' \quad (1)$$

Превышение  $x_t''$  над  $x_t$  тем больше, чем продолжительнее метели. Следовательно, отношение  $\frac{x_t''}{x_{ж}}$  уже не будет стабильным по территории. Оно окажется зависящим от продолжительности метелей  $\tau$  на каждой станции.

Чтобы получить правильные значения  $x_t$ , нужно предварительно вычесть ложные осадки  $x_{л}$  из измеренной суммы  $x_t'$ :

$$x_t = K_t (x_t' - x_{л}). \quad (2)$$

От продолжительности метелей зависит в формуле (2) слагаемое  $x_{л}$ . Следовательно, отношение полученных по формуле (2) величин  $x_t$  к  $x_{ж}$  уже не будет зависеть от  $\tau$ . При этом очевидно, что если величина надувания  $x_{л}$  при расчете по формуле (2) уменьшена, то зависимость  $\frac{x_t}{x_{ж}}$  от  $\tau$  полностью не исчезнет, а если

преувеличена, то получится обратная зависимость. Это соображение и положено в основу способа проверки разработанного в статье [2] метода расчета количества ложных осадков.

В целях облегчения расчеты проделаны по упрощенной схеме. Известно, что при составлении Справочника по климату СССР [3] принималась линейная форма зависимости ветрового поправочного коэффициента  $K_t$  от скорости ветра на уровне приемного отверстия осадкомера. Такое приближение вполне удовлетворительно и для наших расчетов. Значит,

$$K_t = au_2. \quad (3)$$

Здесь коэффициент  $a$  разный для различных, относительно широких интервалов температуры воздуха  $t$  во время снегопадов. Известно также, что для открытых станций скорость ветра на высоте 2 м  $u_2$  есть линейная функция скорости ветра  $u_{ф}$  на высоте флюгера:

$$u_2 = k_{л} u_{ф}. \quad (4)$$

Логарифмический коэффициент  $k_{л}$  зависит только от параметра шероховатости  $z_0$ , который зимой можно везде считать равным 0,5 см, и высоты флюгера  $z_{ф}$ . Следовательно, внутри любого из

интервалов температуры  $t$  ветровой коэффициент  $K_t$  является линейной функцией  $u_{ф, т}$  вида

$$K_t = ak_d u_{ф, т}, \quad (5)$$

где  $u_{ф, т}$  — скорость ветра на уровне флюгера за время выпадения твердых осадков. Пользуясь выражением (5), можно соотношение (1) записать в виде

$$x_t'' = ak_d u_{ф, т} x_t'. \quad (6)$$

Известно, что ветровой коэффициент для жидких осадков  $K_{ж}$  в среднем за сезон равен 1,05—1,10 [6]. Следовательно, исправленная сезонная сумма жидких осадков на 5—10% больше измеренной и в пределах не очень большого района меняется от станции к станции незначительно — не более чем на 5%. Поэтому интересующее нас отношение  $\frac{x_t''}{x_{ж}}$  мало отличается от  $\frac{x_t'''}{x_{ж}}$  и его можно

приближенно записать в виде

$$\frac{x_t''}{x_{ж}} \approx ak_d \frac{x_t'}{x_{ж}} u_{ф, т}. \quad (7)$$

Принимаем, что в пределах каждого отдельно рассматриваемого района средняя многолетняя температура воздуха  $t$  всех станций находится в пределах одного и того же интервала температур зависимости  $K_t$  от  $t$ . Иначе говоря, для всех станций данного района множитель  $a$  в выражении (7) принимаем одинаковым. Считаем, кроме того, что высота флюгера на всех станциях примерно одинакова, т. е. одинаков и множитель  $k_d$  в том же вы-

ражении. Тогда вместо исследования зависимости  $\frac{x_t'''}{x_{ж}}$  от продолжительности метелей  $\tau$  можно исследовать зависимость величины

$\frac{x_t'}{x_{ж}} u_{ф, т}$  от  $\tau$ . Это значительно упрощает вычислительные опера-

ции, так как суммы жидких осадков можно не исправлять вовсе, а суммы твердых осадков достаточно просто умножить на среднюю скорость ветра  $u_{ф, т}$ , взятую непосредственно из Справочника [4], даже без введения в нее поправок, учитывающих отличие ее от средней за сроки со снегопадами [7]. В дальнейшем будем опускать индексы «ф, т» у этой величины, обозначая среднюю сезонную скорость ветра на уровне флюгера для холодного периода просто буквой  $u$ .

Итак, способ проверки достоверности расчетов количества ложных осадков сводится к исследованию зависимости от  $\tau$  двух вели-

чин: 1)  $\frac{x_t'}{x_{ж}} u$  и 2)  $\frac{x_t' - x_{л}}{x_{ж}} u$ .

Для проведения проверки на территории четырех УГМС выделено восемь районов, список которых приведен в табл. 1. Каждый район относительно однороден по режиму осадков (в основном — по их годовому ходу), друг от друга же они отличаются по этому признаку сильно. В пределах районов выбраны возможно более открытые станции. Для каждой из них по месячным нормам измеренных (не исправленных) осадков, взятых из Справочника [3], вычислены сезонные нормы измеренных величин твердых осадков  $x'_T$  за холодный период (ноябрь—март) и сезонные нормы измеренных величин жидких осадков  $x'_{ж}$  за теплый период (апрель—октябрь). Если на некоторых станциях в течение этого теплого периода какое-то время выпадали твердые осадки, то в них учитывалась ветровая ошибка. По месячным нормам скорости ветра, содержащимся в Справочнике [4], вычислялась норма скорости ветра  $u$  за холодный период. Из Справочника [5] выписывалась средняя многолетняя продолжительность метелей  $\tau$ .

Таблица 1

Список районов

| УГМС          | Номер района | Район                                                                                                | Количество станций |
|---------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Северное      | I            | Ненецкий национальный округ                                                                          | 47                 |
| Казахской ССР | II           | и Архангельская область<br>Кустанайская, Кокчетавская,<br>Целиноградская и Павло-<br>дарская области | 30                 |
| Колымское     | III          | Семипалатинская область                                                                              | 14                 |
|               | IV           | Побережье                                                                                            | 20                 |
|               | V            | Внутриконтинентальные<br>районы                                                                      | 22                 |
| Приволжское   | VI           | Татарская АССР                                                                                       | 21                 |
|               | VII          | Оренбургская область                                                                                 | 28                 |
|               | VIII         | Куйбышевская и Ульяновская<br>области                                                                | 20                 |

По полученным данным для каждой станции вычислялась величина  $\frac{x'_T}{x'_{ж}}$  и  $u$ . В качестве примера в табл. 2 приведены результаты вычислений для станций I района (графы 1, 2, 3, 4 и 5). Далее строился график связи между  $\frac{x'_T}{x'_{ж}}$  и  $\tau$ . Пример такого графика, построенного по материалам Северного УГМС, приведен на рис. 1 а.

Каждая точка графика есть, следовательно, величина  $\frac{x'_T}{x'_{ж}}$  и  $u$ ,

Таблица 2

## Результаты расчетов по I району. Северное УГМС

| Номер стан-<br>ции | $x'_T$<br>мм | $x'_{ж}$<br>мм | $u$<br>м/сек. | $\tau$<br>час | $\frac{x'_T}{x'_{ж}} u$ | $\bar{I}_L$<br>мм/час | $x_L =$<br>$= \bar{I}_L \tau$ | $\frac{x'_T - x_L}{x'_{ж}} u$ | $\frac{x'_{T, Л}}{x'_{ж, Л}} u$ |
|--------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|                    | 1            | 2              | 3             | 4             | 5                       | 6                     | 7                             | 8                             | 9                               |
| 1                  | 101          | 250            | 5,5           | 790           | 2,22                    | 0,061                 | 48                            | 1,17                          | —                               |
| 2                  | 123          | 286            | 5,1           | 377           | 2,19                    | 0,058                 | 22                            | 1,80                          | 1,77                            |
| 3                  | 86           | 277            | 5,8           | 740           | 1,80                    | 0,064                 | 47                            | 0,82                          | —                               |
| 4                  | 114          | 269            | 6,8           | 620           | 2,88                    | 0,070                 | 43                            | 1,69                          | 1,59                            |
| 5                  | 88           | 284            | 4,5           | 446           | 1,40                    | 0,054                 | 24                            | 1,01                          | 1,07                            |
| 6                  | 108          | 285            | 7,1           | 500           | 2,66                    | 0,071                 | 36                            | 1,77                          | 1,36                            |
| 7                  | 128          | 346            | 5,0           | 364           | 1,85                    | 0,057                 | 21                            | 1,55                          | 1,50                            |
| 8                  | 122          | 213            | 4,8           | 560           | 1,75                    | 0,056                 | 31                            | 1,30                          | 1,33                            |
| 9                  | 118          | 322            | 5,7           | 740           | 2,09                    | 0,062                 | 46                            | 1,28                          | 1,40                            |
| 10                 | 106          | 230            | 8,4           | 676           | 3,88                    | 0,078                 | 61                            | 1,64                          | 1,41                            |
| 11                 | 144          | 300            | 7,1           | 550           | 2,70                    | 0,071                 | 39                            | 1,68                          | 1,40                            |
| 12                 | 112          | 309            | 6,3           | 458           | 2,29                    | 0,067                 | 31                            | 1,85                          | 1,45                            |
| 13                 | 111          | 312            | 5,3           | 322           | 1,88                    | 0,061                 | 19                            | 1,56                          | 1,41                            |
| 14                 | 126          | 342            | 3,5           | 270           | 1,28                    | 0,044                 | 12                            | 1,16                          | 1,09                            |
| 15                 | 151          | 333            | 7,4           | 510           | 3,36                    | 0,072                 | 37                            | 2,53                          | 1,49                            |
| 16                 | 169          | 390            | 2,7           | 300           | 1,17                    | 0,035                 | 10                            | 1,10                          | 1,05                            |
| 17                 | 143          | 361            | 5,0           | 200           | 1,98                    | 0,058                 | 12                            | 1,81                          | 1,67                            |
| 18                 | 121          | 310            | 5,9           | 455           | 2,31                    | 0,064                 | 29                            | 1,76                          | 1,46                            |
| 19                 | 164          | 380            | 3,0           | 157           | 1,29                    | 0,037                 | 6                             | 1,25                          | 1,15                            |
| 20                 | 146          | 357            | 3,3           | 104           | 1,31                    | 0,040                 | 4                             | 1,27                          | 1,12                            |
| 21                 | 140          | 353            | 4,5           | 210           | 1,79                    | 0,054                 | 11                            | 1,64                          | 1,47                            |
| 22                 | 158          | 430            | 4,6           | 150           | 1,80                    | 0,055                 | 8                             | 1,71                          | 1,42                            |
| 23                 | 174          | 370            | 3,5           | 166           | 1,65                    | 0,044                 | 7                             | 1,58                          | 1,43                            |
| 24                 | 144          | 379            | 3,6           | 180           | 1,37                    | 0,045                 | 8                             | 1,29                          | 1,08                            |
| 25                 | 157          | 382            | 3,5           | 170           | 1,44                    | 0,044                 | 7                             | 1,38                          | —                               |
| 26                 | 168          | 396            | 2,9           | 135           | 1,32                    | 0,036                 | 5                             | 1,28                          | 1,08                            |
| 27                 | 164          | 385            | 3,0           | 110           | 1,28                    | 0,038                 | 4                             | 1,25                          | 1,14                            |
| 28                 | 147          | 376            | 4,2           | 343           | 1,64                    | 0,051                 | 18                            | 1,44                          | 1,39                            |
| 29                 | 190          | 421            | 3,9           | 310           | 1,76                    | 0,048                 | 15                            | 1,62                          | 1,52                            |
| 30                 | 130          | 363            | 3,8           | 320           | 1,36                    | 0,047                 | 15                            | 1,20                          | 1,16                            |
| 31                 | 148          | 383            | 4,8           | 370           | 1,85                    | 0,056                 | 21                            | 1,59                          | 1,55                            |
| 32                 | 124          | 381            | 4,6           | 340           | 1,49                    | 0,055                 | 19                            | 1,27                          | 1,11                            |
| 33                 | 133          | 387            | 2,9           | 230           | 1,00                    | 0,035                 | 8                             | 0,94                          | 0,88                            |
| 34                 | 138          | 376            | 3,8           | 210           | 1,39                    | 0,047                 | 10                            | 1,29                          | 1,18                            |
| 35                 | 176          | 441            | 4,0           | 180           | 1,59                    | 0,050                 | 9                             | 1,51                          | 1,38                            |
| 36                 | 130          | 420            | 6,1           | 695           | 1,89                    | 0,066                 | 46                            | 1,23                          | 1,36                            |
| 37                 | 110          | 333            | 5,6           | 530           | 1,85                    | 0,062                 | 33                            | 1,29                          | 1,25                            |
| 38                 | 106          | 334            | 4,9           | 380           | 1,56                    | 0,058                 | 22                            | 1,23                          | 1,12                            |
| 39                 | 119          | 373            | 3,2           | 360           | 1,02                    | 0,041                 | 15                            | 0,80                          | —                               |
| 40                 | 106          | 327            | 4,5           | 330           | 1,46                    | 0,054                 | 18                            | 1,21                          | 1,18                            |
| 41                 | 100          | 323            | 4,9           | 471           | 1,52                    | 0,058                 | 27                            | 1,11                          | 1,06                            |
| 42                 | 131          | 389            | 3,6           | 280           | 1,21                    | 0,045                 | 13                            | 1,09                          | 0,95                            |
| 43                 | 100          | 204            | 8,8           | 820           | 4,30                    | 0,077                 | 63                            | 1,59                          | 1,73                            |
| 44                 | 143          | 301            | 7,1           | 800           | 3,83                    | 0,071                 | 57                            | 2,03                          | 1,03                            |
| 45                 | 108          | 233            | 7,2           | 900           | 3,34                    | 0,072                 | 65                            | 1,33                          | 1,76                            |
| 46                 | 98           | 240            | 6,5           | 800           | 2,66                    | 0,068                 | 54                            | 1,19                          | 1,49                            |
| 47                 | 138          | 279            | 9,2           | 941           | 5,87                    | 0,078                 | 73                            | 2,15                          | —                               |

рассчитанная по средним многолетним сезонным значениям  $x'_т$  и  $x'_{ж}$  и  $u$  отдельной станции при соответствующей средней многолетней

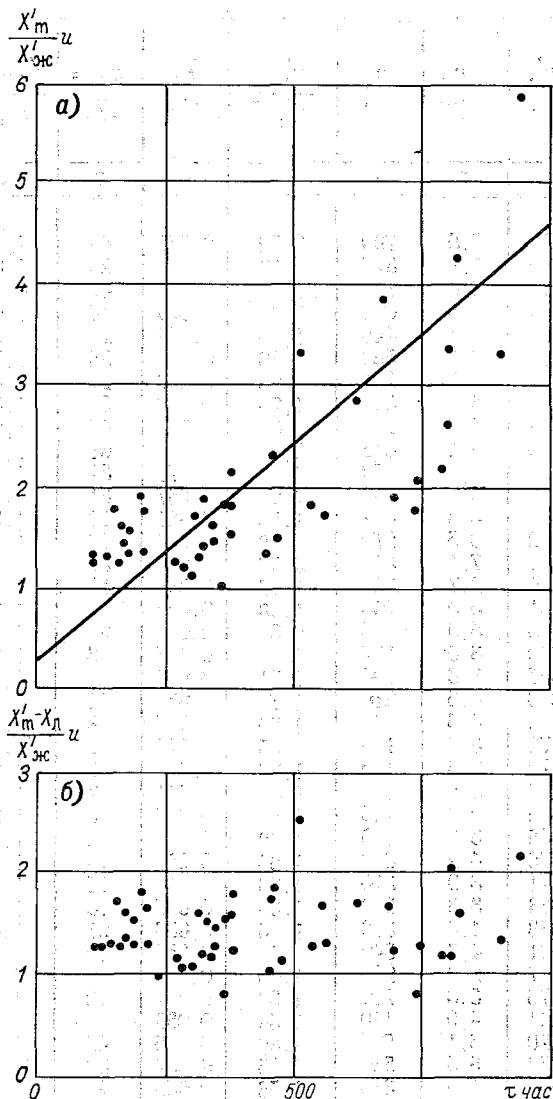


Рис. 1. Зависимость соотношения сумм осадков холодного и теплого периодов от продолжительности метелей  $\tau$  без учета (а) и с учетом (б) надувания в осадкомер ложных осадков для I района.

сезонной продолжительности метелей  $\tau$  на этой станции. Такие же графики представлены на рис. 2 а—4 а.

Из рисунков, видно, что начиная со значений  $\tau \approx 200$  час. за сезон проявляется отчетливый рост величин  $\frac{\chi'_m}{\chi'_{жс}} u$  с ростом  $\tau$ .

В табл. 3 приводятся значения коэффициента корреляции между этими величинами  $r_1$  и, хотя они не велики, все-таки во всех случаях  $r_1 > 3\sigma_{r_1}$ , т. е. связь есть. Уравнения связи характеризуются угловым коэффициентом  $k$  (табл. 3), который меняется от  $0,18 \times$

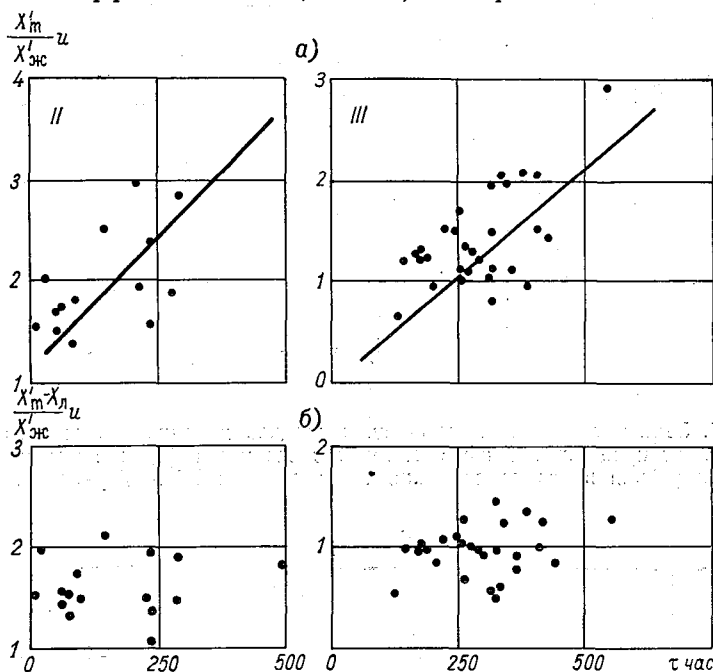


Рис. 2. Зависимость соотношения сумм осадков холодного и теплого периодов от продолжительности метелей  $\tau$  без учета (а) и с учетом (б) надувания в осадкомер ложных осадков для II и III районов.

$\times 10^{-2}$  для континентальной части территории Колымского УГМС до  $0,65 \cdot 10^{-2}$  для территории Татарской АССР. Следовательно, во всех этих весьма различных по режиму осадков, ветра и температуры районах ложные осадки, хотя и в разной степени, но заметным образом влияют на величину отношения исправленных сумм осадков холодного и теплого периодов на открытых станциях.

Далее, чтобы рассчитать отношение осадков холодного и теплого периодов, учитывая ложные осадки, нужно было для всех станций определить сезонную сумму ложных осадков  $\chi_{л}$ . Для этого использована зависимость интенсивности надувания ложных осадков в осадкомер Третьякова  $I_{л}$  от скорости ветра во время метелей, полученная в работе [2]. Непосредственно по схеме, предложенной

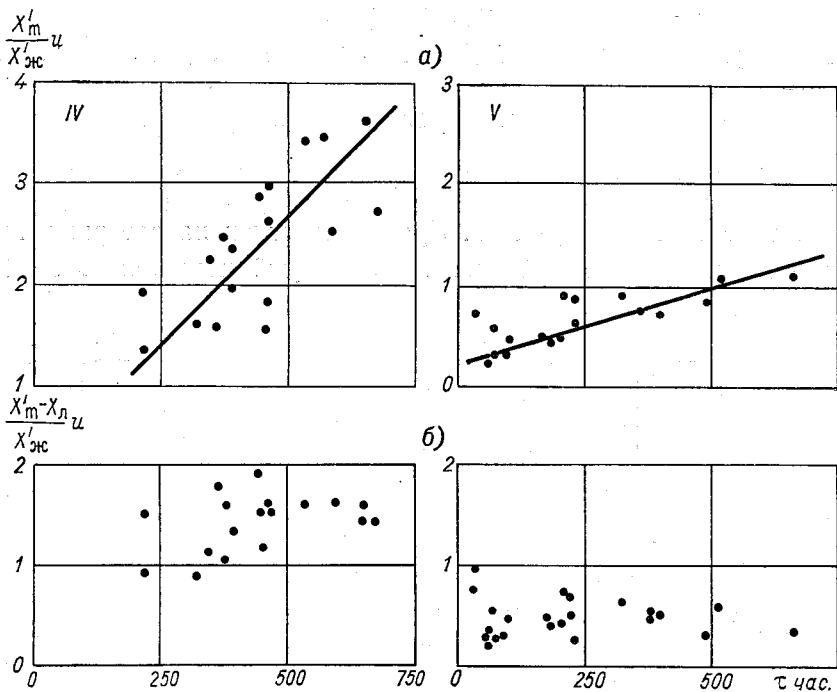


Рис. 3. Зависимость соотношения сумм осадков холодного и теплого периодов от продолжительности метелей  $\tau$  без учета (а) и с учетом (б) надувания в осадкомер ложных осадков для IV и V районов.

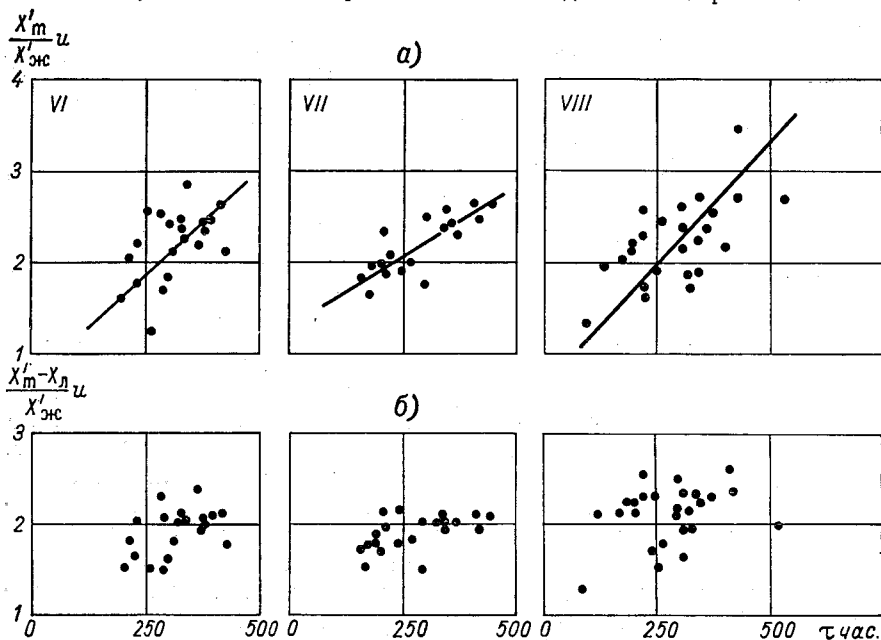


Рис. 4. Зависимость соотношения сумм осадков холодного и теплого периодов от продолжительности метелей  $\tau$  без учета (а) и с учетом (б) надувания в осадкомер ложных осадков для VI, VII и VIII районов.

Характеристика связи величин  $\frac{x'_T}{x_{ж}}$  и  $\tau$  (коэффициент  $r_1$  и  $\sigma_{r_1}$ )

и величин  $\frac{x'_T - x_L}{x_{ж}}$  и  $\tau$  (коэффициент  $r_2$  и  $\sigma_{r_2}$ ).

| Номер района | $r_1$ | $\sigma_{r_1}$ | $r_2$ | $\sigma_{r_2}$ | $k \cdot 10^2$ | Номер района | $r_1$ | $\sigma_{r_1}$ | $r_2$ | $\sigma_{r_2}$ | $k \cdot 10^2$ |
|--------------|-------|----------------|-------|----------------|----------------|--------------|-------|----------------|-------|----------------|----------------|
| I            | 0,65  | 0,08           | 0,16  | 0,14           | 0,46           | V            | 0,92  | 0,03           | 0,17  | 0,21           | 0,18           |
| II           | 0,56  | 0,13           | 0,37  | 0,16           | 0,49           | VI           | 0,57  | 0,15           | 0,31  | 0,20           | 0,65           |
| III          | 0,75  | 0,11           | 0,22  | 0,25           | 0,50           | VII          | 0,53  | 0,14           | 0,36  | 0,16           | 0,61           |
| IV           | 0,74  | 0,10           | 0,24  | 0,21           | 0,58           | VIII         | 0,69  | 0,12           | 0,48  | 0,17           | 0,40           |

в этой работе, рассчитать среднюю сезонную интенсивность надувания ложных осадков  $\bar{I}_L$  можно было только для станций, по которым в Справочнике [5] есть данные о средней многолетней повторяемости  $v_i$  разных скоростей ветра  $u_i$  во время метелей. Расчет в этом случае производится по формуле

$$\bar{I}_L = \frac{\tau_0}{\tau} \sum_i v_i I_{L,0}(u_i) + \frac{\tau_n}{\tau} \sum_i v_i I_{L,n}(u_i). \quad (8)$$

Здесь  $\tau$  — продолжительность всех метелей за сезон,  $\tau_0$  и  $\tau_n$  — продолжительности общих и низовых метелей соответственно,  $I_{L,0}(u_i)$  — интенсивность надувания ложных осадков при скорости ветра  $u_i$  при общих метелях,  $I_{L,n}$  — то же при низовых метелях.

Сведения для расчета по формуле (8) даны в Справочнике далеко не для всех станций. Пришлось прибегнуть к косвенному способу определения  $\bar{I}_L$ . Он оказался достаточно надежным и простым.

Величины  $\bar{I}_L$ , рассчитанные по формуле (8) для всех станций, по которым имелись необходимые данные, были нанесены на графики связи  $\bar{I}_L$  со средней многолетней сезонной скоростью ветра  $u_{ф}$ . Последняя была получена как средняя арифметическая из средних многолетних месячных значений, взятых из Справочника. Подобные графики построены для всех районов СССР, где бывают метели. В качестве примера на рис. 5 приведен такой график для территории Северного УГМС. В расчетах по формуле (8) для построения графика принято (согласно сведениям, приведенным в работе [8]), что для этой территории  $\frac{\tau_0}{\tau} = 0,7$ , а  $\frac{\tau_n}{\tau} = 0,3$ . Связь, как

это сразу видно, достаточно тесная, и величина  $\bar{I}_L$  определяется по ней с погрешностью примерно 3% ее среднего для района значения. Величины  $\bar{I}_L$  для станций, по которым в Справочнике нет

данных о повторяемости скоростей ветра, определяются с помощью полученных графиков очень просто.

Таким образом, имея графики зависимости  $\bar{I}_л$  от  $\bar{u}_ф$ , можно для всех станций района рассчитать количество ложных осадков  $x_л$  по сведениям о средней многолетней скорости ветра  $\bar{u}_ф$  и продолжительности метелей  $\tau$  каждой данной станции:

$$x_л = \bar{I}_л \tau. \quad (9)$$

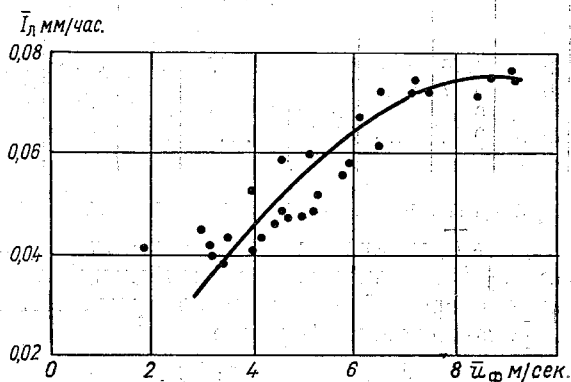


Рис. 5. Зависимость  $\bar{I}_л$  от  $\bar{u}_ф$ . Северное УГМС.

В графах 6 и 7 табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчетов для станций I района (Северное УГМС). Станции выбирались так, чтобы охватить как можно больший диапазон значений  $\tau$  на возможно более однородной по режиму осадков территории.

Зная количество ложных осадков  $x_л$ , можно было вычислить сезонные суммы твердых осадков ( $x'_т - x_л$ ) и рассчитать величины

$\frac{x'_т - x_л}{x'_{ж}}$  (см. графу 8 табл. 2). Они существенно меньше величин

$\frac{x'_т}{x'_{ж}}$  и, вычисленных без поправок на надувание. На рис. 1 б—4 б

помещены графики связи между величинами  $\frac{x'_т - x_л}{x'_{ж}}$  и  $\tau$ . Сразу

видно, что величина  $\frac{x'_т - x_л}{x'_{ж}}$  и от  $\tau$  практически не зависит. Расчет

коэффициентов корреляции подтверждает этот вывод (см. графы  $r_2$  и  $\sigma_{r_2}$  табл. 3): везде  $r_2 < 3\sigma_{r_2}$ . Следовательно, рассчитанные величины  $x_л$  вполне реальны, они не преуменьшены и не

преувеличены. Подчеркнем, что районы, для которых произведен расчет, весьма разные по режиму осадков (их годовому ходу, годовой сумме), ветра, температуры и других показателей. Соответственно величины  $x_{\text{л}}$  очень различны и меняются даже в пределах одного района от 4 до 73 мм (см. табл. 2). Значит, метод расчета  $x_{\text{л}}$ , основанный на использовании эмпирической зависимости  $I_{\text{л}}$  от скорости ветра, достаточно надежен для применения почти на всей территории СССР. Исключение составляют лишь арктические и высокогорные районы, для которых метод пока не проверен.

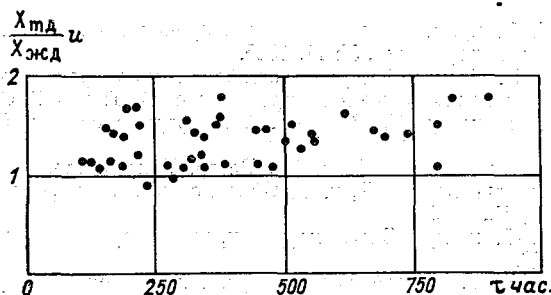


Рис. 6. Зависимость соотношения сумм осадков холодного и теплого периодов от продолжительности метелей, рассчитанная по данным измерений дождемером с защитой Нифера. Северное УГМС.

Можно указать еще одно дополнительное подтверждение того,

что зависимость  $\frac{x'_{\text{т}}}{x'_{\text{ж}}}$  от  $\tau$  обусловлена лишь преувеличением

$x'_{\text{т}}$  за счет попадания в осадкомер ложных осадков  $x_{\text{л}}$ . Известно, что в дождемере с защитой Нифера ложные осадки не задерживаются, так как при большой скорости ветра, когда развивается метель, из этого прибора выдуваются все или почти все осадки, как ложные, так и выпавшие из облаков. Сезонные суммы твердых осадков  $x_{\text{т,д}}$ , измеренные дождемером, во время метелей особенно сильно преуменьшены, а их значения, исправленные ветровой поправкой, которая при большой скорости ветра у этого прибора особенно велика, близки к правильным значениям. Можно соста-

вить отношение  $\frac{x'_{\text{т,д}}}{x'_{\text{ж,д}}}$  только по дождемерным данным (т. е. по

данным измерений осадков до 1952 г.). Если окажется, что оно не зависит от величины  $\tau$ , то это будет означать, что представленная на рис. 1 а—4 а зависимость  $r$  от такого же отношения, составленного по осадкомерным данным, действительно обусловлена лишь искажающим влиянием ложных осадков.

Расчет по дождемерным данным сделан по станциям Северного УГМС (графа 9 табл. 2). Полученные значения нанесены на график (рис. 6). Практически можно считать, что связи нет.

Итак, проведенное исследование подтвердило применимость предложенного в работе [2] способа расчета средней многолетней сезонной суммы ложных осадков, попадающих в осадкомер. Этот способ можно положить в основу уточненной системы корректировки норм осадков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струзер Л. Р. и др. Методика корректировки многолетних норм осадков. Метеорология и гидрология, № 11, 1965.
2. Струзер Л. Р. О способах учета ошибок осадкомеров, вызванных попаданием в них «ложных» осадков во время метелей. Труды ГГО, вып. 260, 1971.
3. Справочник по климату СССР, ч. IV, Атмосферные осадки. Гидрометеиздат, Л., 1968.
4. Справочник по климату СССР, ч. III, Ветер. Гидрометеиздат, Л., 1967.
5. Справочник по климату СССР, ч. V, Облачность и атмосферные явления. Гидрометеиздат, Л., 1969.
6. Струзер Л. Р. и др. Опыт корректировки норм осадков. Труды ГГО, вып. 215, 1968.
7. Богданова Э. Г. Способ расчета средних значений скорости ветра во время выпадения осадков. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
8. Михель В. М., Руднева А. В., Липовская В. И. Переносы снега при метелях и снегопады на территории СССР. Гидрометеиздат, Л., 1969.

## О КОРРЕКТИРОВКЕ РЯДОВ ДОЖДЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТАМИ, ПРИНЯТЫМИ ДЛЯ НОРМ

В «Справочнике по климату СССР» [5], где приведены многолетние значения различных элементов, характеристики осадков получены на основе наблюдений по дождемеру с защитой Нифера, который был принят на сети станций и постов с 1891 г. до начала 50-х годов настоящего столетия, и по осадкомеру Третьякова, действующему на сети с 50-х годов до настоящего времени. Известно [6], что замена дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова привела к более точному измерению твердых и смешанных осадков. Увязка многолетних сумм осадков по двум приборам для вычисления норм осуществлена путем введения поправок в суммы твердых и смешанных осадков за период дождемерных наблюдений. Поправки (в виде коэффициентов  $k_1$ ) определены для отдельных физико-географических районов СССР в зависимости от средней месячной скорости ветра на высоте флюгера и степени защищенности метеорологической площадки от ветра [2]. Степень защищенности характеризуется качественно по физико-географическим описаниям станций и постов.

В приложении к разделу 2 «Атмосферные осадки», IV части «Справочника по климату» помещены значения  $k_1$ , сведения о типах защищенности и датах замены дождемера на осадкомер. Средние многолетние суммы осадков, приведенные к показаниям осадкомера, применяются для решения задач, в которых используются ежегодные величины в сравнении с многолетними. Для приведения месячных сумм осадков за прошедшие (дождемер) и текущие (осадкомер) годы к единому сопоставимому ряду нами были использованы значения  $k_1$ , рекомендованные для норм [5]. Такой грубый подход, однако, имеет некоторое преимущество. Так, нет необходимости пользоваться первичными, зачастую малодоступными для потребителя материалами. Кроме того, одинаковая величина  $k$ , нанесенная на постоянный метеорологический массив перфокарт за соответствующий месяц, дает возможность увязать ряды наблюдений при механизированной обработке на счетно-аналитических машинах.

Для реализации этого метода сделано несколько допущений, а именно: о стабильности типа защищенности площадки, о малой временной изменчивости средней месячной скорости ветра и средней месячной температуры воздуха, т. е. о соответствии вида

осадков конкретных месяцев многолетнему [6]. Рассмотрим, насколько правомочны эти допущения. Первое допущение связано с изменением местоположения и может быть учтено при наличии подробного физико-географического описания конкретного пункта на протяжении всего периода наблюдений. Для двух последних допущений можно привести определенные количественные оценки. Распределение отклонений от нормы месячных значений температуры воздуха в зимние месяцы (одна из характеристик вида твердых осадков [6]) и месячных значений скорости ветра подчиняется нормальному закону. Поэтому изменчивость этих параметров может быть оценена стандартными отклонениями. В работе Э. Г. Богдановой [1] приведены стандартные отклонения средней месячной температуры воздуха  $\sigma_t$  в интервале от 0 до  $-30^\circ$  и стандартные отклонения средней месячной скорости ветра  $\sigma_u$  от 1 до 11 м/сек.

Известно [6], что твердые осадки выпадают преимущественно при температуре ниже  $-2^\circ$ . Несколько сложнее обстоит дело при выпадении смешанных осадков. В переходные месяцы имеет место островершинность распределения, и поэтому недостаточно характеризовать изменчивость температуры воздуха только стандартными отклонениями  $\sigma_t$ , как это делается в зимние месяцы, когда на большей части Советского Союза ее распределение близко к нормальному.

Для средней месячной температуры от  $-2$  до  $-4^\circ$   $\sigma_t$  изменяется в пределах  $\pm(2-3)^\circ$ . Такая большая изменчивость от года к году говорит о том, что в отдельные конкретные месяцы может наблюдаться температура, близкая к  $0^\circ$ , что связано с изменением вида осадков. В этом случае нарушается соответствие вида осадков конкретных месяцев многолетним, и  $k_1$  может оказаться заниженным или завышенным. Здесь, однако, следует заметить, что значение  $k_1$  в переходные месяцы мало ( $4-7\%$ ) [2, 5, 6], а следовательно, погрешность в пересчете будет невелика.

Известно, что при выпадении осадков наиболее часто наблюдаются месячные скорости ветра от 3 до 6 м/сек. [6]. Этому интервалу скоростей соответствует  $\pm\sigma = 0,9 \div 1,2$  м/сек. [1]. По этой причине можно заведомо указать, что на севере Европейской территории СССР и Казахстана, в Среднем и Нижнем Поволжье, в прибрежных районах величина  $k_1$  в конкретные месяцы на открытых станциях может быть принята с ошибкой более чем 10%.

Мы считали ряды дождемерных и осадкомерных наблюдений сопоставимыми, если ошибка не превышала 10%.

Материалом для анализа послужили наблюдения 15 УГМС, что составило для 237 станций за 3—4 года 3452 месяца с твердыми и смешанными осадками. В данные дождемерных наблюдений конкретных месяцев были введены принятые для норм значения  $k_1$  из Справочника [5]. Результаты расчета сравнивались с одновременными наблюдениями по осадкомеру. Отношение измеренных по осадкомеру сумм осадков и рассчитанных с помощью  $k_1$  по дождемеру ( $\bar{k}$ ) за 3—4 года колеблется в пределах 0,90—1,10 (табл. 1). На рис. 1 для примера дано территориальное

распределение  $k_2$  для Белорусского УГМС. Оказалось, что 230 месяцев (7%) выходят за пределы принятой точности расчета (табл. 2). Однако эти случаи имели место на 96 станциях (40% общего числа рассмотренных станций). Такой большой территориальный разброс связан с изменчивостью в отдельные годы ветрового и термического (в основном в переходные месяцы) режима.

Таблица 1

Распределение по УГМС средних и крайних значений  $k_2$

| Управление                           | Количество |         | $k_2$   |         |      |
|--------------------------------------|------------|---------|---------|---------|------|
|                                      | станций    | месяцев | среднее | крайнее |      |
|                                      |            |         |         | <1,0    | >1,0 |
| Мурманское                           | 13         | 258     | 0,91    | 0,92    | 1,10 |
| Северо-Западное                      | 39         | 982     | 0,98    | 0,88    | 1,12 |
| Эстонской ССР                        | 16         | 72      | 1,00    | 0,94    | 1,21 |
| Латвийской ССР                       | 10         | 89      | 1,02    | 0,91    | 1,26 |
| Белорусской ССР                      | 25         | 347     | 0,99    | 0,94    | 1,14 |
| Центрально-Чернозем-<br>ных областей | 11         | 59      | 0,98    | 0,90    | 1,00 |
| Верхне-Волжское                      | 19         | 389     | 0,97    | 0,86    | 1,20 |
| Приволжское                          | 33         | 550     | 1,12    | 0,88    | 3,00 |
| Уральское                            | 6          | 36      | 1,01    | 0,96    | 1,10 |
| Казахской ССР                        | 36         | 332     | 0,99    | 0,90    | 1,28 |
| Омское                               | 10         | 89      | 1,00    | 0,99    | 1,20 |
| Западно-Сибирское                    | 6          | 129     | 1,09    | —       | —    |
| Якутское                             | 1          | 5       | 1,00    | —       | —    |
| Хабаровское                          | 5          | 29      | 1,00    | 1,00    | 1,02 |
| Сахалинское                          | 7          | 86      | 1,13    | —       | —    |
| Всего                                | 237        | 3472    |         |         |      |

Таблица 2

Повторяемость  $k_2$ , превышающих  $\pm 10\%$

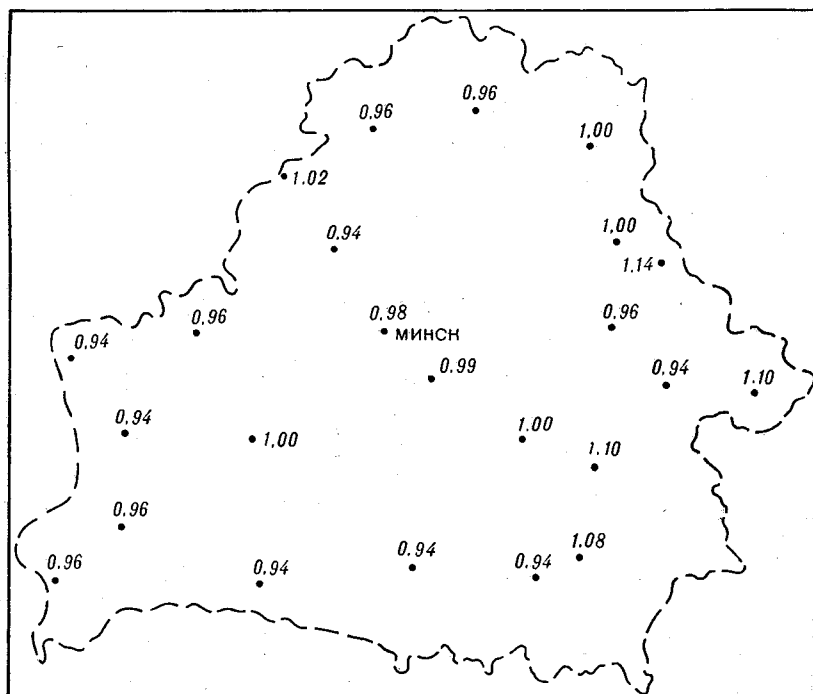
|               | 0,31—0,50 | 0,51—0,70 | 0,71—0,80 | 0,81—0,90 | 1,11—1,20 | 1,21—1,50 | 1,51—1,80 | >1,80 | Всего |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| Число случаев | 5         | 14        | 30        | 60        | 25        | 51        | 16        | 29    | 230   |
| Проценты      | 2         | 6         | 13        | 26        | 11        | 22        | 7         | 13    | 100   |

Величина  $k_2$  может быть как больше, так и меньше единицы. В 11 случаях наблюдались  $k_2 > 2,0$ . В марте на станциях Бузулук (1952 г.), Омск и Исылкуль (1948 г.) оно превысило 3,0. Для станций, на которых наблюдалась большая изменчивость  $k_2$

Таблица 3

Крайние значения  $k_2$  ‰ за отдельные месяцы и амплитуда  $A$ 

| Станция     | $k_2$ |      | $A$ | Станция         | $k_2$ |      | $A$ |
|-------------|-------|------|-----|-----------------|-------|------|-----|
|             | <100  | >100 |     |                 | <100  | >100 |     |
| Апатиты     | 2     | 26   | 28  | Калинин         | 31    | 0    | 31  |
| Арск        | 48    | 128  | 176 | Калуга          | 24    | 23   | 47  |
| Брест       | 4     | 66   | 70  | Кашира          | 60    | 79   | 139 |
| Белев       | 11    | 31   | 42  | Клин            | 14    | 84   | 98  |
| Бологое     | 35    | 0    | 35  | Ловозеро        | 24    | 22   | 46  |
| Безенчук    | 63    | 15   | 78  | Лодейное Поле   | 20    | 9    | 29  |
| Витебск     | 30    | 25   | 55  | Мончегорск      | 19    | 15   | 34  |
| Вязовая     | 16    | 38   | 54  | Мурманск        | 21    | 2    | 23  |
| Горки       | 0     | 72   | 72  | Марьина Горка   | 0     | 72   | 72  |
| Дрисса      | 19    | 0    | 19  | Могилев         | 41    | 53   | 94  |
| Житковичи   | 20    | 0    | 20  | Михнево         | 14    | 17   | 31  |
| Жлобин      | 0     | 82   | 82  | Новый Иерусалим | 19    | 97   | 116 |
| Загорск     | 9     | 62   | 71  | Невьянск        | 18    | 30   | 48  |
| Зашеек      | 21    | 0    | 21  | Омск, степная   | 26    | 276  | 302 |
| Ирикля      | 14    | 56   | 70  | Собакино        | 18    | 66   | 84  |
| Кузнецк     | 5     | 70   | 75  | Сухо, маяк      | 56    | 0    | 56  |
| Краснощелье | 5     | 86   | 91  | Териберка       | 19    | 21   | 40  |
|             |       |      |     | Шарковщина      | 24    | 33   | 57  |

Рис. 1. Распределение  $k_2$  на территории Белорусской ССР.

в отдельные месяцы, приведены фактические крайние значения  $k_2$  и амплитуда  $A$  (табл. 3).

С. Д. Полисадов [4] для пяти станций с разной степенью защищенности и расположенных в различных зонах Западной Сибири (Тобольск, Тара, Одесское, Ишим и Кондинское-Октябрьское) также для данных за отдельные годы применил метод, использованный для корректировки норм. Показана малая временная изменчивость  $K$ .

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения одного среднего коэффициента из Справочника для приведения показаний дождемера к осадкомеру за конкретные годы (особенно для зимнего периода) при исследованиях, когда допустима погрешность более чем  $\pm 10\%$ . Для расчетов, требующих большей точности, можно рекомендовать ознакомиться с разделом 3 «Корректировки измеренных месячных сумм осадков за прежние годы» из работы [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Э. Г. Анализ точности определения ветровой поправки к результатам измерения твердых осадков. Труды ГГО, вып. 260, 1970.
2. Методические указания управлениям Гидрометслужбы. Устранение неоднородности между рядами дождемерных и осадкомерных наблюдений. Ротапринт ГГО, Л., 1964.
3. Указания для управлений Гидрометеорологической службы по вычислению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. Гидрометеониздат, Л., 1969.
4. Полисадов С. Д. О корректировке осадков за расчетные периоды конкретных лет на территории Западной Сибири. Науч. тр. Омского сельскохозяй. ин-та им. С. М. Кирова, том 75, вып. 1, 1969.
5. Справочник по климату СССР, часть IV. Гидрометеониздат, Л., 1967—1970.
6. Швер Ц. А. Исследование результатов наблюдений по осадкомеру и дождемеру. Гидрометеониздат, Л., 1965.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО МНОГОЛЕТНЕГО ДЕФИЦИТА ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ДНИ С ОСАДКАМИ

Как известно [1, 2, 3, 4], потери собранных осадкомерным прибором осадков вследствие их испарения из осадкосборника составляют заметную часть их месячной суммы. В предыдущих статьях [3, 5] по данным сравнительно небольшого числа станций эти потери оценивались в пределах 1—10% суммы осадков. Хотя потери на большей части территории СССР и не очень велики, их все же надо было учитывать при корректировке измеренных сумм осадков. В связи с этим были разработаны и опробованы различные методы расчета потерь на испарение [5]. Наиболее точный из этих методов, при котором используются фактические значения дефицита влажности воздуха  $d$  и скорости ветра на уровне осадкомера (на высоте 2 м)  $u_2$  за фактическое время испарения  $t$ , а также действительное число измерений осадков  $M$  в течение месяца, пригоден лишь в качестве контрольного, так как перечисленные данные нельзя получить из материалов наблюдений основной гидрометеорологической сети. Они регистрировались лишь во время экспериментальных осадкомерных наблюдений на небольшом числе испытательных пунктов. Поскольку практические потребности вынуждают вести расчет величин испарения из осадкомера по всей территории Советского Союза, нужно найти способ расчета по материалам стандартных наблюдений метеорологической сети.

В статье [5] было показано, что средние месячные величины испарения  $E$  мм из осадкомера, рассчитанные по средним месячным значениям дефицита влажности  $d$ , скорости ветра  $u$  м/сек. и числа дней с дождем  $D$ , помещенным в Метеорологических ежемесячниках и Справочниках по климату, близки к фактическим в средней полосе страны, меньше фактических в северной части территории и больше — в южной. Причина расхождений в том, что при выпадении жидких осадков (апрель—сентябрь) в дни без дождя в южных районах страны величина дефицита влажности в дневные сроки наблюдений резко возрастает; в северных районах дефицит влажности за ночные и утренние сроки всегда очень мал, существенно меньше, чем днем, даже при выпадении осадков. В результате средние месячные величины дефицита влажности  $d$ , вычисленные по всем срокам наблюдений на станции в течение месяца, оказывались в южных районах существенно выше, а в северных районах ниже, чем средние значения дефицита влажности  $d_d$  в дни

с осадками, когда, собственно, и происходит их испарение. При таких обстоятельствах правильнее всего было вести расчет испарения  $E$  по фактическим средним значениям  $d_d$ , заранее вычисленным для каждой станции. Но, как уже отмечалось, это невозможно, и не только из-за трудоемкости выборки величин дефицита за отдельные дни и сроки наблюдений за много лет по каждой станции, но и из-за отсутствия первичных материалов наблюдений по многим станциям за прошлые годы.

Поэтому в качестве первого приближения было решено рассчитывать испарение  $E$  из осадкомера по средним месячным значениям дефицита влажности, опубликованным в Справочнике по климату и в Метеорологических ежемесячниках. Для южных районов (южнее  $50^\circ$  с. ш.) для летних месяцев способ расчета уточнялся: средний месячный дефицит влажности вычислялся только по данным ночных и утренних сроков наблюдений, в связи с чем, как показано в [5], его значение оказывалось более или менее близким к значению среднего дефицита  $d_d$  в дни с дождем.

На основании расчетов этим методом по данным 250 станций были составлены карты вероятных средних многолетних величин испарения из осадкомера (в процентах от средней многолетней суммы осадков). Карты были опубликованы [6] для использования при корректировке измеренных осадкомером величин осадков.

Опыт практического использования карт показал, что вычисленные поправки на испарение недостаточно точны в переходные сезоны (весна и осень), а карты схематичны из-за малого числа учтенных пунктов. В процессе последующего уточнения карт было решено перейти к вычислениям испарения  $E$  по данным о фактическом дефиците влажности  $d_d$  в дни с выпадением осадков.

Поскольку непосредственно  $d_d$ , как уже говорилось, получить было нельзя, следовало найти его косвенным, расчетным путем, по связи с другими параметрами, известными из материалов наблюдений станций. В основу поиска связей были положены следующие соображения. Очевидно, что в дни с дождем дефицит влажности в дневные сроки наблюдений на станции будет меньше по абсолютной величине, чем в дни без дождя. Следовательно, чем больше дождливых дней в данном месяце, тем меньше будет разница между средним месячным значением дефицита влажности  $d$  (которое публикуется в Метеорологическом ежемесячнике, а за многолетний период — в Справочнике по климату) и средним месячным значением дефицита влажности  $d_d$  за дни с дождем, когда реально происходит испарение собранных прибором осадков. Эти же соображения справедливы и для дней с выпадением смешанных или твердых осадков, хотя в холодное время года  $d$  в общем мало отличается от  $d_d$ . Таким образом, можно было попытаться найти

связь вида  $k=f(D)$ , где  $k=\frac{d_d}{d}$ ,  $D$  — число дней с выпадением осадков в течение месяца. Ясно, что такая связь будет более тесной и физически оправданной, если вместо  $D$  взять число сроков измерения осадков  $M$ .

Наблюдения за осадками производятся два раза в сутки. Отмечено, что в дни, когда в осадкомере в оба срока были осадки, испарение оказывалось вдвое больше, чем в дни с осадками только в первой или во второй части суток.

Связь вида  $k=f(M)$  отыскивалась по результатам детальных выборок из первичных материалов наблюдений 18 станций за пятилетний период. Эти станции были выбраны в различных климатических зонах и широтных поясах по всей территории страны, так как первоначально предполагалось, что характер связи будет различным в зависимости от климатических особенностей. Станции были объединены в три группы, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Список станций, материалы наблюдений которых использованы  
для расчета

| Станция                       | Период<br>наблюдения,<br>годы | Характеризуемый<br>район |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Группа А (севернее 60° с. ш.) |                               |                          |
| Мурманск                      | 1960—1964                     | } Арктическое побережье  |
| Нарьян-Мар                    | 1960—1964                     |                          |
| Котлас                        | 1960—1964                     |                          |
| Салехард                      | 1960—1964                     | } Север АТС и ЕТС        |
| Туруханск                     | 1960—1964                     |                          |
| Ербогачен                     | 1960—1964                     |                          |
| Ногаева, бухта                | 1960—1964                     | Тихоокеанское побережье  |
| Группа Б (от 60 до 50° с. ш.) |                               |                          |
| Вильсанди                     | 1961—1965                     | Прибалтика               |
| Пинск                         | 1958—1962                     | Запад ЕТС                |
| Красные Баки                  | 1960—1964                     | Верхнее Поволжье         |
| Старчепко                     | 1959—1965                     | Украина                  |
| Сплавнуха                     | 1960—1964                     | Среднее Поволжье         |
| Чердынъ                       | 1960—1964                     | Предуралье               |
| Томмот                        | 1955—1959                     | Якутское нагорье         |
| Группа В (южнее 50° с. ш.)    |                               |                          |
| Балцаты                       | 1960—1964                     | Черноморское побережье   |
| Гигант                        | 1960—1964                     | Северный Кавказ          |
| Змеиногорск                   | 1960—1964                     | Средняя Азия             |
| Южно-Курильск                 | 1960—1964                     | Тихоокеанское побережье  |

По каждой станции за пятилетний период были вычислены средние для каждого месяца значения  $d_d$  только за сутки с осадками,  $d$  за все сутки месяца,  $t_d$  за сутки с осадками и  $t$  за все дни месяца, а также число измерений осадков  $M$  в течение месяца.

Далее были вычислены отношения  $k = \frac{d_d}{d}$ . Расчеты проведены по данным 821 станция-месяц.

Первые же попытки анализа связи  $k=f(M)$  показали, что характер связи зависит не от географического положения станции (север или юг территории, побережье или степь и т. д.), а от абсолютного значения температуры воздуха  $t_d$  во время осадков. Поскольку между средними значениями  $t_d$  и  $t$  больших систематических различий нет, в дальнейшем принималась во внимание только средняя температура воздуха  $t$  и выявлялась связь  $k=f(M, t)$ .

Найденные отношения  $k=\frac{d_d}{d}$  и соответствующие им величины  $M$  были рассортированы по 12 температурным градациям, указанным в табл. 2.

Таблица 2

Температурные градации сортировки средних  $k$  и  $M$

| Номер градаций | Градация температуры, °С |     | Окончательная градация, °С | Номер градаций | Градация температуры, °С |    | Окончательная градация, °С |
|----------------|--------------------------|-----|----------------------------|----------------|--------------------------|----|----------------------------|
|                | от                       | до  |                            |                | от                       | до |                            |
| I              | ниже                     | —20 | ниже —20                   | VIII           | 1                        | 3  | выше +1                    |
| II             | —20                      | —10 |                            | IX             | 3                        | 5  |                            |
| III            | —10                      | —5  | от —20 до —3               | X              | 5                        | 10 |                            |
| IV             | —5                       | —3  |                            | XI             | 10                       | 20 |                            |
| V              | —3                       | —1  |                            | XII            | выше                     | 20 |                            |
| VI             | —1                       | —0  | от —3 до +1                |                |                          |    |                            |
| VII            | 0                        | 1   |                            |                |                          |    |                            |

Границы разных градаций температуры первоначально были выбраны более или менее произвольно. Из общих физических соображений было ясно, что вблизи 0° должна произойти резкая смена зависимости  $k$  от числа измерений  $M$ , так как именно при этой температуре исчезает устойчивый снежный покров, сглаживающий перепады влажности в отдельные дни, и происходит смена твердых осадков жидкими и смешанными.

Внутри указанных в табл. 2 температурных градаций отношения  $k=\frac{d_d}{d}$  осреднялись в пределах четырех последовательных значений  $M$ , т. е. при  $M$ , равном 4—7, 8—11, 12—15 и т. д.; среднему значению отношения  $k$  приписывалась средняя взвешенная величина  $M$ . Для контроля возможного влияния географического положения станции такое осреднение сделано отдельно по трем указанным в табл. 1 широтным группам станций. Результаты были нанесены на рабочие графики, аналогичные приведенным на рис. 1—4, вначале по каждой градации температуры отдельно.

Анализ показал, что для трех групп температурных градаций, а именно: II—IV, V—VII и VIII—XII (см. табл. 2), кривые на графиках практически совпадают. Малые различия можно объяснить разной обеспеченностью данными на том или ином участке кривой.

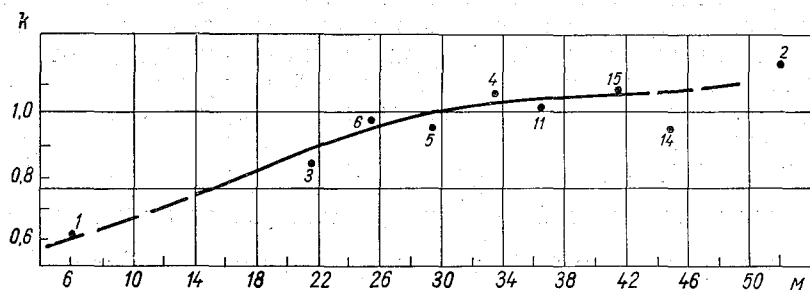


Рис. 1. График зависимости  $k=f(M)$  для температур ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ .  
Значения  $k$  имеются только для станций, расположенных севернее  $60^{\circ}\text{с. ш.}$

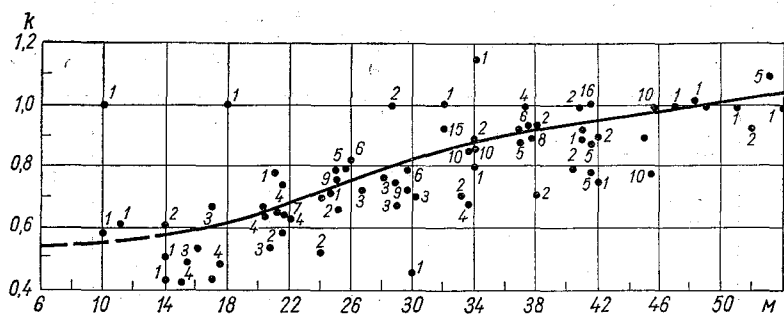


Рис. 2. График зависимости  $k=f(M)$  для температур от  $-20$  до  $-3^{\circ}\text{C}$ .

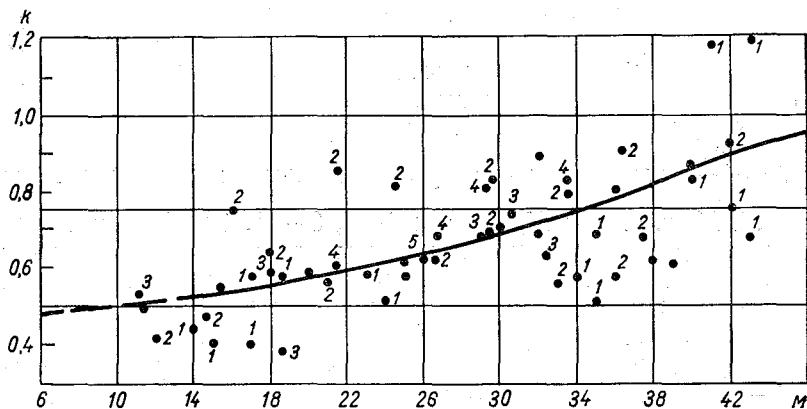


Рис. 3. График зависимости  $k=f(M)$  для температур от  $-3$  до  $1^{\circ}\text{C}$ .

Поэтому первоначальные 12 температурных градаций было целесообразно объединить в четыре более широкие градации, которые указаны в табл. 2. Для каждой из этих четырех температурных градаций на рис. 1—4 представлено поле эмпирических точек зависимости  $k=f(M)$ . Они нанесены одинаковыми значками, так как систематической тенденции распределения точек ни в зависимости от температуры  $t$  внутри данной градации, ни в зависимости от географической широты станции не проявилось. Иначе говоря, величина  $k$  есть функция только  $M$  независимо от географического расположения станции. Цифры у точек на графиках указывают число станция-месяцев, по которому данная точка получена.

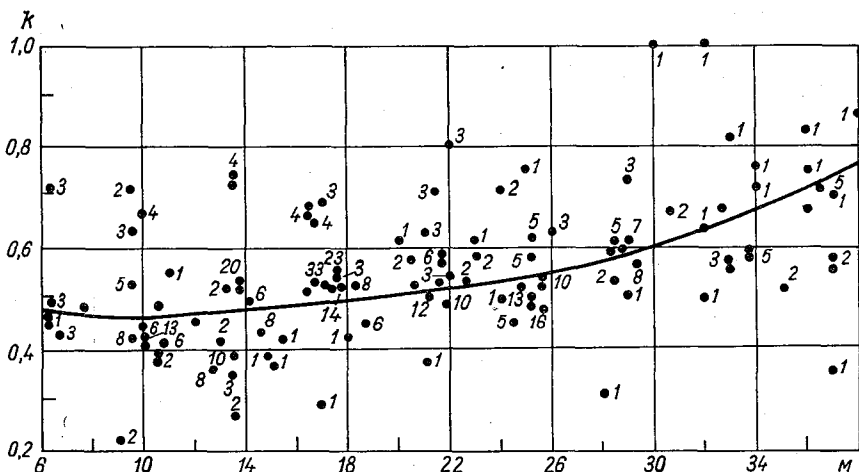


Рис. 4. График зависимости  $k=f(M)$  для температур выше  $1^{\circ}\text{C}$ .

Распределение точек на графиках указывает на существование достаточно тесной зависимости  $k$  от  $M$ . Поэтому для каждой из четырех температурных градаций были найдены средние кривые зависимости  $k=f(M)$ . Для этого осреднялись значения  $k$  всех точек, попавших в интервал  $M$  шириной в четыре последовательных значения этой величины. При осреднении число станция-месяцев  $n$ , по которым определена каждая точка графика, учитывалось в качестве веса. В табл. 3 приведены полученные средние значения  $k$ , им соответствующие числа  $n$  и средние квадратические отклонения  $\sigma_k$  отдельной точки от среднего значения  $k$  в данном интервале  $M$ .

Как видно из таблицы, средние квадратические отклонения отдельных точек от кривых примерно одинаковы на всем протяжении графиков. Абсолютные величины отклонений (с учетом того, что каждая точка представляет данные конкретных месяцев) также говорят об устойчивости найденной связи.

На рис. 5 нанесены все четыре кривые  $k=f(M)$ . В совокупности они дают графическое изображение зависимости  $k=f(M, t)$ . Оказалось, что каждая кривая соответствует определенным сред-

ним погодным условиям. Градация температур  $-20^{\circ}\text{C}$  и ниже характеризует наиболее холодные месяцы зимы и весны на северных станциях. Колебания дефицита влажности в течение всего месяца очень малы, поэтому  $d_{\text{д}}$  весьма близко к  $d$ . Некоторое снижение кривой при малом числе  $M$  определяется точками, соответствующими весенним месяцам, когда при средней месячной температуре ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  в отдельные солнечные дни температура, а следовательно, и дефицит влажности увеличиваются.

Градация температур от  $-20$  до  $-3^{\circ}\text{C}$  соответствует преобладающим погодным условиям устойчивой зимы на всей территории страны. При наличии постоянного снежного покрова и выпадении

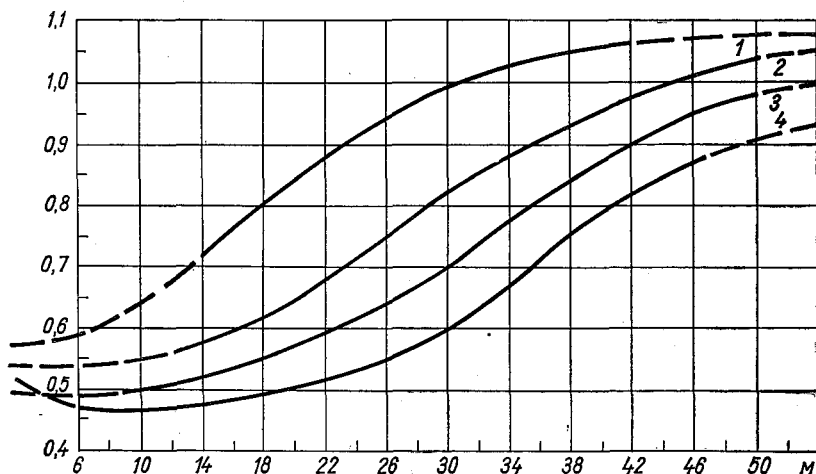


Рис. 5. Обобщенный график эмпирической зависимости  $k=f(Mt)$ .

1)  $\bar{t} \leq -20^{\circ}$ , 2)  $-20^{\circ} < \bar{t} \leq -3^{\circ}$ , 3)  $-3^{\circ} < \bar{t} \leq 1^{\circ}$ , 4)  $\bar{t} > 1^{\circ}$ .

твердых осадков различие между  $d_{\text{д}}$  и  $d$  становится заметным лишь в те месяцы, когда по крайней мере 10 дней отмечено без выпадения осадков.

Градация от  $-3$  до  $+1^{\circ}\text{C}$  соответствует погодным условиям переходных (весна и осень) сезонов с выпадением смешанных осадков и избыточным увлажнением поверхности почвы.

Градация положительных температур выше  $+1^{\circ}\text{C}$  соответствует сезону выпадения жидких осадков. Различие между средним месячным дефицитом  $d$  и средним дефицитом в дни с дождем  $d_{\text{д}}$  в этом сезоне всегда существенно даже в месяцы, когда отмечалось 20—22 дождевых дня; оно возникает за счет очень резкого увеличения дефицита влажности во все сроки наблюдения в дни без дождя.

Найденная эмпирическая зависимость  $k=f(M, t)$  дает возможность для любой станции найти значение дефицита влажности в дни с дождем  $d_{\text{д}}=kd$ , где  $d$  — средний месячный дефицит влажности, взятый из Справочника по климату или Метеорологических ежемесячников. Само значение  $k$  определяется с помощью графика

Таблица 3

Средние значения отношения  $k$  в зависимости от числа измерений осадков  $M$  по градам температур воздуха

| Градации температуры, °С | Величина на    | Интервалы М |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | общее |
|--------------------------|----------------|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          |                | 4—7         | 8—11 | 12—15 | 16—19 | 20—23 | 24—27 | 28—31 | 32—35 | 36—39 | 40—43 | 44—47 | 48—51 | 52—55 |       |
| —20 и ниже               | n              | 1           | —    | —     | —     | 3     | 6     | 5     | 4     | 11    | 15    | 14    | —     | 2     | 60    |
|                          | k              | 0,60        | —    | —     | —     | 0,84  | 0,95  | 0,95  | 1,05  | 1,03  | 1,07  | 0,97  | —     | 1,15  | —     |
|                          | σ <sub>k</sub> | —           | —    | —     | —     | 0,16  | 0,24  | 0,10  | 0,27  | 0,22  | 0,24  | 0,10  | —     | 0,15  | 0,20  |
| от —20 до —3             | n              | —           | —    | 3     | 19    | 38    | 25    | 32    | 46    | 26    | 35    | 23    | 2     | 9     | 258   |
|                          | k              | —           | —    | 0,56  | 0,52  | 0,66  | 0,73  | 0,77  | 0,84  | 0,90  | 0,93  | 0,95  | 1,00  | 1,04  | —     |
|                          | σ <sub>k</sub> | —           | —    | 0,13  | 0,18  | 0,18  | 0,18  | 0,26  | 0,18  | 0,15  | 0,24  | 0,21  | 0,14  | 0,20  | 0,20  |
| от —3 до +1              | n              | —           | 5    | 8     | 18    | 10    | 16    | 25    | 9     | 5     | 6     | —     | —     | —     | 102   |
|                          | k              | —           | 0,48 | 0,54  | 0,56  | 0,63  | 0,67  | 0,68  | 0,76  | 0,86  | 0,89  | —     | —     | —     | —     |
|                          | σ <sub>k</sub> | —           | 0,16 | 0,12  | 0,18  | 0,13  | 0,15  | 0,16  | 0,16  | 0,15  | 0,24  | —     | —     | —     | 0,16  |
| +1 и выше                | n              | —           | 46   | 86    | 77    | 53    | 69    | 30    | 15    | 15    | —     | —     | —     | —     | 391   |
|                          | k              | —           | 0,47 | 0,45  | 0,51  | 0,53  | 0,54  | 0,58  | 0,64  | 0,68  | —     | —     | —     | —     | —     |
|                          | σ <sub>k</sub> | —           | 0,19 | 0,17  | 0,19  | 0,21  | 0,15  | 0,24  | 0,16  | 0,14  | —     | —     | —     | —     | 0,18  |

на рис. 5 по величине средней месячной температуры воздуха, взятой из Справочника или Метеорологического ежемесячника, и по числу измерений осадков  $M$ . Число  $M$  может быть вычислено по формуле (7) из статьи [5]:

$$M = \frac{\Delta q \cdot x}{0,2 \cdot 100},$$

где  $x$  — месячная сумма осадков, взятая из Справочника,  $\Delta q$  — поправка на смачивание, снятая с карты, помещенной в статью [7].

Описанный метод был использован для расчета величин испарения из осадкомера при составлении уточненных карт поправок к месячным суммам осадков. Результаты были признаны хорошими, поскольку они оказались близкими к результатам определения испарения контрольным методом.

Описанный метод расчета  $d_d$  может быть, по-видимому, полезным также и в других областях, например в агрометеорологии или для определения закономерностей коррозии материалов, т. е. всегда, когда требуется знать среднюю величину дефицита влажности воздуха в дни с дождем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Струзер Л. Р., Нечаев И. Н., Богданова Э. Г. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков. Метеорология и гидрология, № 10., 1965.
2. Нечаев И. Н. Исследование погрешностей измерения атмосферных осадков, вызванных испарением их из прибора. Труды ГГО, вып. 215, 1969.
3. Нечаев И. Н. Потери на испарение из осадкомерных приборов в разных климатических зонах. Труды ГГО, вып. 215, 1969.
4. Дубровин Л. В. Экспериментальное определение испарения из осадкомерных и дождемерных ведер. Труды ГГО, вып. 215, 1969.
5. Нечаев И. Н. Учет потерь на испарение из осадкомера при измерении осадков. Труды ГГО, вып. 244, 1969.
6. Указания для управлений Гидрометеорологической службы по вычислению поправок к измеренным величинам атмосферных осадков. Гидрометеоиздат, 1969.
7. Нечаев И. Н. Корректировка месячных и годовых норм осадков поправками на смачивание осадкомерных сосудов. Труды ГГО, вып. 195, 1966.

## К РАСЧЕТУ ВЕЛИЧИН ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ПОЧВУ

Существующая методика расчета потока тепла в почву, изложенная в [1], часто приводит к значительным ошибкам в определении величины потока тепла: как правило, потоки тепла за 13 и особенно 16 час. значительно занижаются, максимум потока сдвигается на 10 час. В летние месяцы (июль—август) поток тепла за 16 час. по всем станциям получается отрицательным, в то время как градиент температуры еще сохраняет положительное значение. В результате этого суточный ход потока тепла в почву сильно искажается. Поэтому возникла необходимость разработки такого метода расчета, который позволил бы не только освободиться от этих ошибок в будущем, но и обработать заново весь прежний материал наблюдений для получения неискаженных многолетних норм потока тепла в почву.

Известно, что величина потока тепла через поверхность в глубину почвы выражается формулой

$$P = -\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности почвы на ее поверхности,  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$  — градиент температуры почвы на поверхности.

Однако непосредственные расчеты теплового потока  $P$  по формуле (1) до последнего времени не делались вследствие того, что не было метода измерения величин  $\lambda_0$  и  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$ . Ниже приводится обоснование для расчета этих величин по имеющимся наблюдениям над температурой почвы по коленчатым термометрам и влажностью почвы в слое от 0 до 20 см.

В работе [3] дано обоснование плавного (монотонного) изменения температуры почвы с глубиной. Обычно профили температуры позволяют интерполяцию значений температуры для любых промежуточных точек по данным опорных точек.

Для этой цели можно пользоваться интерполяционной формулой Лагранжа.

Согласно этой формуле, для функции  $y = f(z)$  имеем:

$$y = f(z) = y_0 \frac{(z-z_1)(z-z_2)\dots(z-z_n)}{(z_0-z_1)(z_0-z_2)\dots(z_0-z_n)} + \\ + y_1 \frac{(z-z_0)(z-z_2)\dots(z-z_n)}{(z_1-z_0)(z_1-z_2)\dots(z_1-z_n)} + \dots + \\ + y_n \frac{(z-z_0)(z-z_1)\dots(z-z_{n-1})}{(z_n-z_0)(z_n-z_1)\dots(z_n-z_{n-1})}.$$

Для температуры почвы, измеренной на глубинах 0, 5, 10, 15, 20 см, на глубине  $z = 1$  см формула Лагранжа дает

$$t_1|_{z=1} = 0,638t_0 + 0,638t_5 - 0,425t_{10} + 0,182t_{15} - 0,034t_{20}. \quad (2)$$

Расчеты показали, что обычно значения температуры на глубине 1,0 см, полученной по формуле (2) и фактической, совпадают с точностью до  $0,1^\circ$ , и рассчитанные величины хорошо согласуются с графиком.

Такого рода графики были построены для ряда станций для разных месяцев, декад и дней (более 100 графиков), и во всех случаях рассчитанные величины ложились строго на профиль. Анализ профилей температуры показал, что величину  $t_0 - t_1$  можно без заметных погрешностей приравнять к величине  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$ , учитывая линейный ход температуры с глубиной в верхнем сантиметровом слое почвы.

Используя формулу Лагранжа, можно показать, что температура на глубине 0,5 см ( $t_{0,5}$ ) рассчитывается по формуле

$$t_{0,5} = 0,808t_0 + 0,358t_5 - 0,254t_{10} + 0,111t_{15} - 0,021t_{20}. \quad (3)$$

Расчеты по формуле  $t_{0,5} = \frac{t_0 + t_1}{2}$  дают в соответствии с (2)

$$t_{0,5} = 0,819t_0 + 0,319t_5 - 0,212t_{10} + 0,091t_{15} - 0,017t_{20},$$

что практически совпадает с расчетами по формуле (3).

В табл. 1 приводятся в качестве примера результаты расчета градиента температуры в поверхностном слое почвы по интерполированным значениям температуры на глубинах 0,5 и 1,0 см, которые получены по формулам (3) и (2) соответственно за сентябрь 1965 г. для ст. Куйбышев.

Как видно из табл. 1, вычисленные значения  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$  для одного и другого случаев почти совпадают, и нельзя найти какой-либо систематической погрешности определения величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$ , если рассчитывать ее по температуре на глубине 0,5 или 1,0 см.

Аналогичные расчеты были выполнены для ряда станций и сроков и во всех случаях величины  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$ , рассчитанные по значениям  $t_{0,5}$  и  $t_{1,0}$ , практически совпадали, т. е. можно принять

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = t_0 - t_1 \text{ град/1 см.} \quad (4)$$

В Куйбышевской ГМО был создан прибор [2], измеряющий градиенты температуры почвы в верхнем сантиметровом слое почвы. Наблюдения по этому прибору полностью подтвердили результаты, полученные по формулам (2) и (4).

Следует заметить, что рассчитывать величины  $t_0 - t_1$  по формулам (2) и (4) значительно целесообразнее, чем непосредственно измерять температуру на поверхности и глубине 1 см.

Таблица 1

Градиенты температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ), вычисленные по разным формулам за различные сроки.  
Куйбышев

| Формула | Сроки, часы |      |     |     |     |      |
|---------|-------------|------|-----|-----|-----|------|
|         | 1           | 7    | 10  | 13  | 16  | 19   |
| (3)     | —1,3        | —0,5 | 2,6 | 3,6 | 1,4 | —1,6 |
| (2)     | —1,2        | —0,4 | 2,6 | 3,5 | 1,5 | —1,5 |

Зачастую ошибки измерений на глубинах 0 и 1 см могут быть разных знаков, а при расчетном методе это в значительной мере исключается, если учитывать, что главным источником ошибок является температура поверхности почвы, которая входит в величину  $t_{1,0}$  в соответствии с (2). Поэтому разность  $t_0 - t_1$  по расчетному методу вычисляется точнее, чем по непосредственным измерениям. Это существенное преимущество расчетного метода. Расчеты показывают, что при ошибке в температуре почвы  $1^{\circ}$  ошибка в величине  $t_0 - t_1$  по расчетному методу составит всего лишь  $0,3^{\circ}$ , в то время как при разных знаках ошибок она могла бы быть порядка  $2^{\circ}$ . Формулы (2) и (4) действительны для любого периода осреднения. По этим формулам и рассчитываются величины  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$  для всех сроков по средним месячным данным.

Перейдем к вопросу о расчете величины  $\lambda_0$ . Расчетный метод определения  $\lambda_0$  может быть применен только в том случае, когда имеет место монотонный суточный ход величин  $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$ , что обеспечивается только для средних за месяц и декаду данных. Для ежедневных данных излагаемый метод не применим.

С достаточным основанием можно принять, что для средних за месяц данных величина  $\lambda_0$  не имеет заметного суточного хода. Тогда, используя формулу (1), можно для месячных данных для любого промежутка времени суток написать

$$\lambda_0 = - \frac{P}{\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}}. \quad (5)$$

В свою очередь величина  $P$  может быть получена как изменение теплосодержания слоя почвы от 0 до 20 см за промежуток между сроками измерения распределения температуры почвы по глубине, отнесенное к единице времени, при условии, что за этот период тепловой поток на глубине 20 см был равен нулю.

Анализ материалов наблюдений ст. Куйбышев за ряд лет показал, что период времени 10—13 час. является именно таким периодом.

В Куйбышевском ГМО при помощи тепломеров системы ГГО, установленных на глубине 20 см, было определено, что в течение лета ежедневно тепловой поток в почве за промежуток времени с 10 до 13 час. на глубине 20 см практически был равен нулю. Это подтвердилось материалами градиентных наблюдений ряда других станций. По материалам наблюдений за температурой почвы в верхнем слое для ряда станций были построены профили распределения температуры почвы с глубиной за сроки 10 и 13 час., с которых и были сняты величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=20}$  для глубины 20 см.

В табл. 2 приведены эти данные.

Таблица 2

Средние для периода 10—13 час. величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=20}$  для ряда станций по месяцам (град/см)

| Станция      | Год  | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     |
|--------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Тамды        | 1966 | —0,03 | —0,03 | +0,07 | +0,02 | —0,02 | —0,12 | —0,24 |
| Архангельск  | 1965 | —     | +0,05 | +0,13 | +0,10 | +0,06 | +0,03 | —0,03 |
| Якутск       | 1966 | —     | —     | 0,00  | —0,01 | —0,01 | —0,04 | —     |
| Рудный       | 1965 | —     | +0,09 | +0,07 | +0,07 | +0,02 | —0,02 | —0,06 |
| Огурцово     | 1965 | —     | +0,15 | +0,10 | —0,02 | —0,08 | —0,08 | —0,09 |
| Куйбышев     | 1967 | —     | +0,03 | +0,05 | +0,04 | +0,03 | —0,07 | —     |
| Аскания Нова | 1966 | —0,01 | —0,02 | +0,03 | +0,02 | +0,02 | +0,02 | —0,03 |

Поскольку величины  $\lambda_0$  не превышают 0,1, величины теплового потока в почву  $P$  для случаев, приведенных в табл. 2, значительно меньше 0,01 кал/см<sup>2</sup> мин.

Из таблицы видно, что только для ст. Тамды в октябре  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=20}$  достигает —0,24 град/см при  $\lambda_0 = 0,05$ ; величина  $P_{20} = 0,05$  (—0,24) =

$= -0,01$  кал/см<sup>2</sup> мин. Аналогичные расчеты показывают, что для ст. Огурцово за сентябрь 1965 г.  $P_{20} = 0,004$  кал/см<sup>2</sup> мин., а за октябрь 1965 г.  $P_{20} = 0,003$  кал/см<sup>2</sup> мин. Для ст. Архангельск за июнь 1965 г.  $P_{20} = 0,005$  кал/см<sup>2</sup> мин. Можно отметить, что в редких случаях величина потока тепла на глубине 20 см с 10 до 13 час. достигает 0,01 кал/см<sup>2</sup> мин.; обычно она практически равна нулю. Величина же потока тепла через поверхность почвы в это время обычно равна 0,10—0,30 кал/см<sup>2</sup> мин. Поэтому наиболее благоприятным для расчетов является период с 10 до 13 час., и все средние величины в (5) целесообразно рассчитывать именно за этот период. По формулам ГГО среднее  $P_{10-13} = \frac{cS_1}{180}$ , где  $S_1$  также вычисляется за период 10—13 час. Величина  $S_1$  и величина объемной теплоемкости  $c$  вычисляется также по формулам ГГО, изложенным в действующем Руководстве.

Итак,

$$\lambda_0 = - \frac{cS_1^{10-13}}{180 \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}}. \quad (6)$$

Величина  $\lambda_0$ , рассчитанная по формуле (6), используется для всех сроков данного месяца.

Следует заметить, что для учета теплового потока на глубине 20 см в 10 и 13 час. нет принципиальных трудностей и для некоторых станций в отдельные месяцы можно использовать для этой цели тепломеры ГГО. В большинстве случаев в этом нет необходимости.

При вычислении средней за период 10—13 час. величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$  предполагается, что для осредненных за месяц дан-

ных суточных ход величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$ , определяемый главным образом величиной радиационного баланса, достаточно плавный и закономерный. Это позволяет использовать для расчета средней за период 10—13 час. величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$  интерполяционные формулы.

Сначала по формуле Лагранжа рассчитывается величина  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$  за 11,5 часа (середина периода с 10 до 13 час.). Обозначим для сокращения величины  $\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}$  через  $d$ . Тогда формула Лагранжа дает

$$d_{11,5} = 0,563(d_{10} + d_{13}) - 0,062(d_7 + d_{16}), \quad (7)$$

где величины  $d_7, d_{10}, d_{13}, d_{16}$  рассчитываются по формулам (2) и (4).

Затем по формуле парабол (Симпсона) по ординатам  $d_{10}$ ,  $d_{11,5}$ ,  $d_{13}$  вычисляем интеграл величины  $d$  за период 10—13 час.

$$\int_{10}^{13} d \cdot dt = \frac{h}{3} (d_{10} + 4d_{11,5} + d_{13}),$$

где величина  $h=1,5$  часа. Разделив полученный интеграл на время (3 часа), получим среднюю за период 10—13 час. величину

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{d_{10} + 4d_{11,5} + d_{13}}{6}. \quad (8)$$

По формулам (1), (2), (4), (6), (7), (8) решают задачу аналитического расчета величин теплового потока в почве по средним месячным данным за прошлые годы.

Этот метод расчета теплового потока в почве позволяет рассчитать не искаженные величины потока. При этом отмечается четкая зависимость теплового потока в почве от величин радиационного баланса и влажности почвы. Ранее эти зависимости затушевывались значительными искажениями величин теплового потока в почве, допускаемыми при обработке данных прежним методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. Гидрометеиздат, Л., 1964.
2. Дубровин Л. В. Прибор для измерения градиентов температуры в верхнем слое почвы. Сборник работ Куйбышевской ГМО, вып. 4, 1967.
3. Дубровин Л. В. Графический метод критического контроля наблюдений за температурой почвы по глубинным термометрам. Труды ГГО, вып. 96, 1959.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ СУММ ОСАДКОВ, ОСРЕДНЕННЫХ ПО 15-МИНУТНЫМ ИНТЕРВАЛАМ

В настоящее время существует уже довольно обширная литература, посвященная исследованию статистической структуры полей сумм осадков, осредненных за самые разные временные интервалы, такие, как месяц, декада, сутки, полусутки, продолжительность дождя [9, 6, 2, 5, 10, 11]. Сведения же о структуре полей сумм осадков, осредненных за существенно меньшие временные интервалы, исключительно скудны и практически несравнимы [12, 13 и др.].

Между тем такого рода сведения необходимы для решения целого ряда задач, связанных с геофизическими методами измерения осадков (с помощью радиолокаторов, спутников и других летательных аппаратов), с вопросами размещения метеорологической сети, сельского хозяйства.

Именно для целей спутниковой метеорологии и проводилась настоящая работа. Данные об осадках, полученные наземным радиолокатором или аппаратурой, устанавливаемой на разного рода летательных аппаратах, являются результатом интегрирования и последующего осреднения этих осадков по некоторой площади.

Естественно предположить, что всякое осреднение влечет за собой некоторое сглаживание общей картины пространственного распределения поля осадков, имеющего сложную очаговую структуру. Сглаживание при этом будет зависеть как от масштабов исследуемой территории, так и от структуры самого измеряемого объекта.

В связи с этим возникает необходимость

- исследовать пространственную структуру поля осадков,
- оценить различия между осредненными по площади характеристиками структуры поля осадков и фактическими величинами осадков.

В настоящей статье используются материалы наблюдений трех ливнемерных кустов: Валдайского, Велико-Анадольского и Дубовского.

Валдайский ливнемерный куст расположен в средней части Валдайской возвышенности, в радиусе около 50 км, с центром в г. Валдае. Общий характер местности в районе ливнемерного куста холмисто-озерный. Наибольшая разность высот около 200 м. Около 70% территории занято лесами, часть ее заболочена.

Велико-Анадольский ливнемерный куст расположен в Донецкой области Украинской ССР, в южной части отрогов Донецкого кряжа. Площадь ливнемерного куста 5000 км<sup>2</sup>. Абсолютные отметки высот 215—268 м. Наиболее густо посты расположены в центральной части куста — в районе Велико-Анадольского лесничества. Здесь расстояние между соседними постами не превышает 3—4 км. На окраине куста расстояние между соседними постами больше, около 10 км.

Дубовский ливнемерный куст расположен в центральной части засушливых Сальских степей. Абсолютные отметки высот в районе куста лежат в пределах 50—132 м. Рельеф — слегка возвышенная равнина с мягковолнистыми формами.

Для исследования пространственной структуры полей 15-минутных сумм осадков были использованы данные Валдая за три месяца (июнь—август) 1953 г., Дубовки за пять месяцев (май—сентябрь) 1953 г. и Велико-Анадолья за три месяца (июнь—август) 1953 г.

В идеальном случае надо было бы в качестве периода осреднения брать 1 мин. или даже доли минуты, т. е. отрезок времени, соизмеримый со временем пролета спутника над заданной территорией или временем оборота антенны локатора. Однако в связи с тем что в распоряжении имелись только плувиографические записи хода дождей по характерным точкам, обработка осадков по минутным интервалам представлялась не только исключительно трудоемкой, но и практически неосуществимой. Кроме того, обработка данных об осадках по периодам времени меньше 15 мин. была бы сильно затруднена из-за растянутости интервалов времени между отметками «особых точек» на плувиографической ленте.

### Корреляционные функции 15-минутных сумм осадков

Прочно утвердившиеся в практике метеорологических расчетов современные методы исследования пространственной структуры полей осадков, как и методы исследования других метеорологических элементов, в основном базируются на применении статистических характеристик случайных полей — структурных, ковариационных и корреляционных функций. Наиболее полно эти методы исследования пространственной структуры полей жидких осадков изложены в работах, выполненных в Главной геофизической обсерватории [5, 8]. Однако, как показал еще в 1966 г. Р. Л. Каган [8], при вычислениях корреляционных функций сумм осадков приходится сталкиваться с целым рядом трудностей как технического, так и принципиального характера. При этом основную трудность представляет физическое обоснование определения подлежащей вычислению величины, особенно при малых периодах суммирования.

В силу того, что осадки выпадают на той или иной территории, как правило, не во всех точках, а пятнами, неясно, каким образом

при расчетах должна осуществляться корреляция: только между пунктами, находящимися в пределах одного пятна, либо между всеми осадкомерными пунктами независимо от того, наблюдались или нет в них одновременно осадки.

Особенности поля осадков, а именно его пятнистость, делают затруднительной даже саму формулировку задачи о расчете корреляционных функций, становящихся, по существу, условными характеристиками.

В зависимости от условий задачи можно на одном и том же материале наблюдений станции иметь сильно отличающиеся друг от друга корреляционные функции. Основная трудность при этом заключается в обосновании норм, от которых эти функции рассчитываются.

Норма была бы вполне определенной, если бы во внимание принимались все случаи, независимо от того, отмечались осадки на территории или нет. Однако это было бы крайне трудоемким делом. Если же вычислять норму осадков только за те случаи, которые вошли в расчет, то результат существенно зависел бы от структуры областей осадков, так как одновременное отсутствие осадков на сравниваемых станциях тоже создает корреляцию. Нормы осадков, определенные в этих случаях, были бы несколько преувеличены, особенно для центра района, по которому рассматривается поле осадков.

Поскольку периферия области выпадения, осадков, чаще всего оказывается почти незаполненной осадками, увеличение площади района приводит к уменьшению среднего количества осадков по площади. Это происходит вплоть до момента попадания в новую область осадков.

Все указанные выше трудности не касаются метеорологических элементов, которые распределяются в пространстве непрерывно.

Для сумм же осадков они становятся тем существенней, чем за меньшие интервалы времени они исследуются.

Если за месяц осадки выпадают практически везде на исследуемой территории, за сутки они почти сплошь покрывают территорию, связанную с прохождением фронта, то за интервал времени в несколько минут области осадков могут иметь весьма сложную структуру в виде отдельных очагов осадков, перемежающихся местами их полного отсутствия.

Для того чтобы придать пространственной корреляционной функции определенность, были введены поправки в ковариационные функции и дисперсии для тех дней, когда на данной паре станций осадков не наблюдалось.

Для простоты расчетов различия норм осадков в пределах территории исследования не учитывались. Поскольку в исследуемых районах нормы осадков меняются в пространстве медленнее, чем их аномалии, было сделано допущение, что норма опорной станции является также нормой для всего района. Такая норма является естественной характеристикой исследуемой территории. В соответствии с принятыми допущениями ковариация в случае

отсутствия осадков превращается в произведение норм или в первом приближении в квадрат нормы. Это определяет и вид формулы для расчета корреляционной функции сумм осадков, осредненных за малые временные интервалы, в данном случае за 15 мин.:

$$R(\rho) = \frac{\sum (x_a - \bar{x})(x_b - \bar{x}) + (k - n) \bar{x}^2}{\sqrt{\sum [(x_a - \bar{x})^2 + (k - n) \bar{x}^2] \sum [(x_b - \bar{x})^2 + (k - n) \bar{x}^2]}}. \quad (1)$$

Здесь  $x_a$  и  $x_b$  есть 15-минутные суммы осадков в точках  $a$  и  $b$ ,  $\bar{x}$  — месячная норма осадков для исследуемой территории, отнесенная к 15-минутному интервалу,  $n$  — число случаев, когда осадки были хотя бы на одной станции,  $k - n$  — число случаев, когда осадки отсутствовали на обеих станциях коррелируемой пары,  $k = 31 \times 96 = 2976$  — число 15-минутных интервалов в месяце, содержащем 31 день,  $k = 30 \times 96 = 2880$  — число 15-минутных интервалов в месяце, содержащем 30 дней.

В результате выполненных на ЭВМ расчетов было получено для района Валдая около 2300 коэффициентов корреляции, для района Велико-Анадолья около 1700 и для района Дубовки около 700 коэффициентов корреляции.

Каждый коэффициент  $R$  для определенной пары станций в соответствии с расстоянием между ними  $\rho$  заносился в ту или иную из заданных градаций расстояний.

Рассчитанные таким образом значения корреляционной функции 15-минутных сумм осадков приведены в табл. 1.

Несмотря на то что каждый из коэффициентов корреляции рассчитан по материалам лишь за теплый период одного года, надежность полученных данных о статистической структуре поля 15-минутных сумм осадков ввиду большого числа использованных случаев 15-минутных интервалов представляется достаточно высокой.

Корреляционные функции для всего интервала расстояний представлены на рис. 1—3.

Обращает на себя внимание следующее.

Несмотря на значительный разброс, который претерпевают коэффициенты корреляции, зависимость  $R$  от  $\rho$  очевидна. Можно проследить в целом закономерное убывание корреляционной функции с увеличением расстояния.

В сухих районах юга, представленных Велико-Анадольским и Дубовским ливнемерными кустами, в летние месяцы (июнь—август) корреляция прослеживается до расстояния 60—65 и 35—50 км соответственно.

Судя по идентичности автокорреляции месячных сумм осадков на территории Дубовки и в районах однотипных с ней в климатическом отношении, таких, как Северный Крым, Южное Поволжье и Южное Зауралье, можно предположить, что и статистические характеристики полей осадков, осредненных за 15-минутные интервалы, будут в этих районах довольно близки.

Эта группа районов занимает зону южных степей, обладающих

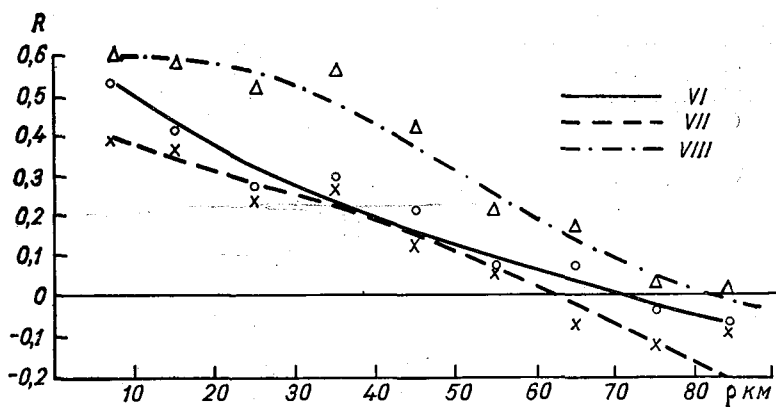


Рис. 1. Корреляционные функции 15-минутных сумм осадков. Валдай.

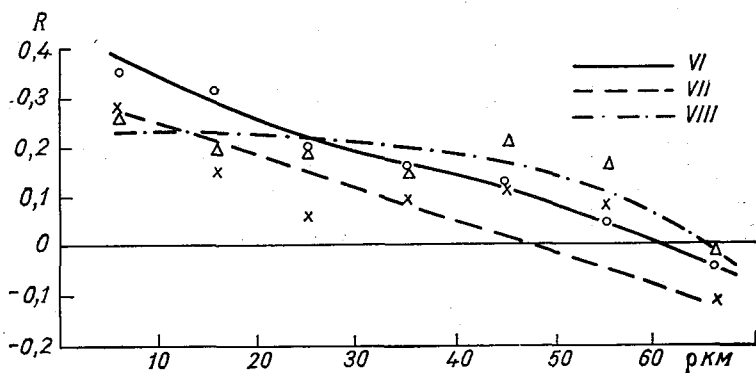


Рис. 2. Корреляционные функции 15-минутных сумм осадков. Велико-Анадоль.

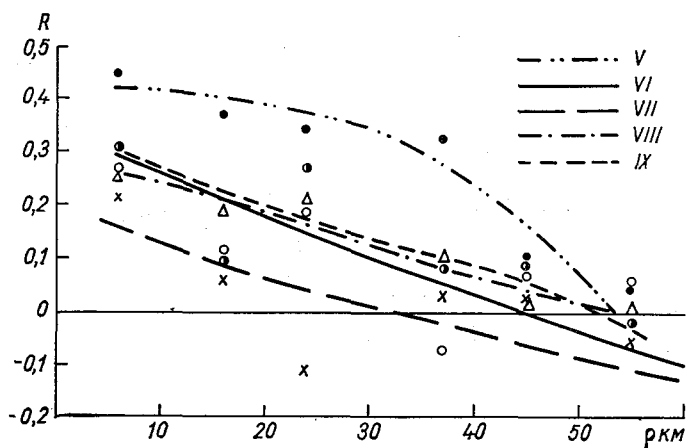


Рис. 3. Корреляционные функции 15-минутных сумм осадков. Дубовка.

совершенно своеобразным характером распределения осадков, в особенности летних. Для этой территории летом характерно размывание фронтов, мощное развитие конвективных процессов, сопровождающихся грозовыми явлениями и ливнями.

Таблица 1

Корреляционные функции 15-минутных сумм осадков

| Месяц | р км |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|       | 7    | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | 84 |

Валдай

|      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| VI   | 0,54 | 0,41 | 0,27 | 0,29 | 0,21 | 0,07 | 0,07  | -0,04 | -0,07 |
| VII  | 0,39 | 0,37 | 0,24 | 0,27 | 0,13 | 0,07 | -0,07 | -0,12 | -0,09 |
| VIII | 0,60 | 0,58 | 0,52 | 0,52 | 0,42 | 0,21 | 0,17  | 0,03  | 0,02  |

|   |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|
| 6 | 16 | 25 | 35 | 45 | 55 | 66 |
|---|----|----|----|----|----|----|

Велико-Анадоль

|      |      |      |      |      |      |      |       |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| VI   | 0,35 | 0,31 | 0,19 | 0,15 | 0,12 | 0,04 | -0,05 |
| VII  | 0,28 | 0,15 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,08 | -0,12 |
| VIII | 0,26 | 0,19 | 0,19 | 0,15 | 0,20 | 0,15 | -0,02 |

|   |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|
| 6 | 16 | 24 | 37 | 45 | 55 |
|---|----|----|----|----|----|

Дубовка

|      |      |      |       |       |      |       |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|
| V    | 0,46 | 0,38 | 0,35  | 0,33  | 0,11 | 0,05  |
| VI   | 0,27 | 0,11 | 0,19  | -0,07 | 0,07 | 0,06  |
| VII  | 0,21 | 0,05 | -0,23 | 0,03  | 0,02 | -0,06 |
| VIII | 0,26 | 0,19 | 0,21  | 0,10  | 0,02 | 0,01  |
| IX   | 0,31 | 0,10 | 0,27  | 0,08  | 0,09 | -0,02 |

Расстояние, на котором корреляционная функция переходит через нуль, по всей вероятности, соответствует масштабу областей осадков, являющихся элементами мезоструктуры поля осадков.

Как показал О. А. Дроздов [7], связи уже по месячным суммам осадков в сухих районах юга в пределах одной области выпадения дождя с расстоянием падают очень быстро.

Что касается 15-минутных сумм осадков, процесс ликвидации связи между ними с расстоянием становится более интенсивным и притом настолько, что связь ливневых осадков может полностью теряться в пределах одного пятна.

Совершенно иная картина наблюдается в северных районах избыточного увлажнения, представленных Валдайским ливнемерным кустом.

Зоны фронтальных осадков обложного характера обычно охватывают в этих районах значительные территории. Этим здесь, по-видимому, обусловлено и более медленное убывание корреляционной функции сумм осадков с расстоянием по сравнению с более южными сухими районами. С увеличением расстояния между двумя пунктами, расположенными в районах с избыточным увлажнением, вероятность того, что оба они попадут в один ливневый очаг, существенно больше, чем в районах недостаточного увлажнения. Так, корреляция в районе Валдая в летние месяцы прослеживается уже до расстояний 65—80 км.

В течение теплого времени года связи, естественно, распространяются на большие расстояния весной и осенью (50—55 км), чем летом, когда осадки в значительной мере формируются за счет ливней (35—50 км). Это отчетливо видно на примере Дубовского ливнемерного куста.

Абсолютная величина корреляционных функций на малых расстояниях в районе Валдая существенно больше, чем в районах Велико-Анадоля и Дубовки. Физическое обоснование этого факта, по-видимому, также можно искать в характере распределения осадков по площади.

Пятна дождя в районе Валдая в соответствии с их природой больше пятен осадков в районах Велико-Анадоля и Дубовки и, следовательно, связь ближайших пунктов между собой здесь на малых расстояниях должна быть больше.

Наиболее быстрое убывание корреляционной функции во всех районах и по всем месяцам отмечается до расстояний 5—15 км. Объяснение этому можно найти в том, что корреляция осадков до расстояний 5—15 км в значительной мере обусловлена тем, что сравниваемые пункты относятся к одному и тому же очагу осадков. Для больших расстояний такая возможность маловероятна.

В то же время зоны обложных осадков обычно охватывают значительные территории и, очевидно, этим обусловлено более медленное убывание корреляционной функции в районе Валдая по сравнению с районами Велико-Анадоля и Дубовки.

### **Редукция 15-минутных сумм осадков по площади**

Известные в литературе методы исследования неравномерности выпадения осадков на площади, вычисления средней по площади по данным в отдельных точках и оценки точности осреднения по площади по данным в отдельных точках базируются на применении так называемого коэффициента редукции (убывания) осадков по площади [3, 4, 8].

Остановимся на двух таких методах, нашедших наиболее широкое применение в практике метеорологических и гидрологических расчетов. Так, весьма обоснованные рекомендации относительно исследования неравномерности выпадения осадков на площади имеются в работах, выполненных З. П. Богомазовой и З. П. Петровой [3, 4]. Неравномерность выпадения осадков по

площади учитывается этими авторами коэффициентом редукции определенным из соотношения

$$I = \frac{H_{\text{ср}}}{H_0}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{ср}}$  — слой осадков, соответствующий рассматриваемой площади  $F$  км<sup>2</sup>,  $H_0$  — средний слой осадков, соответствующий площади  $F = 100$  км<sup>2</sup>.

Метод Богомазовой и Петровой, разработанный для ливневых осадков, нашел широкое применение в практике гидрологических расчетов. Однако выведенная эмпирическим путем зависимость между слоем осадков и площадью их распространения оказалась неприменимой для наших целей, поскольку она не позволяет оценивать погрешности осреднения по площади экстремальных величин.

Р. Л. Каганом [8] был разработан метод исследования редукции сумм осадков по площади относительно центра дождя, основанный на применении структурных и корреляционных функций суточных и полусуточных сумм осадков. Последнее обстоятельство не позволило использовать в данной работе и этот метод, поскольку, как уже было показано выше, вычисление корреляционных функций сумм осадков за малые периоды времени имеет ряд принципиальных отличий от вычисления этих функций для сумм осадков за большие временные интервалы (сутки, полусутки и т. д.).

Таким образом, одной из задач настоящей работы была разработка метода, позволяющего исследовать редукцию сумм осадков по площади относительно центра их распространения для фиксированного момента дождя, целого дождя или группы дождей. Решение этой задачи сводилось к следующему.

Первоначально рассчитывалась редукция осадков по прямой. В качестве характеристики изменчивости интенсивности осадков по прямой была использована следующая элементарная величина:

$$\eta = \frac{i_n + i_{\text{max}}}{2i_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{max}}$  — интенсивность в центре дождя,  $i_n$  — интенсивность в любой другой точке поля осадков.

Другими словами,  $\eta$  является средней из показаний двух станций, отнесенной к величине интенсивности осадков в центре.

Преобразовав выражение (3) следующим образом:

$$\eta = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{i_n}{i_{\text{max}}} \right),$$

можно выделить из него величину  $\xi$ , характеризующую непосредственно изменчивость в любой точке поля относительно интенсивности в центре дождя,

$$\xi = \frac{i_n}{i_{\text{max}}} = 2\eta - 1. \quad (4)$$

Рассчитанная через  $\eta$  в относительных единицах характеристика  $\xi$  становится более устойчива по площади, чем величина  $\frac{i_n}{i_{\max}}$ , рассчитанная в абсолютных единицах, и лучше поддается анализу.

Далее путем интегрирования этой характеристики по площади был получен коэффициент редукции  $k$  интенсивности (15-минутных сумм) осадков по площади относительно центра дождя,

$$k = \frac{\int_0^r 2\pi\xi\rho d\rho}{\pi r^2}. \quad (5)$$

В качестве исходного материала для расчета коэффициента редукции по прямой и по площади использовались те же плювиографические записи хода дождей по характерным точкам, что и для расчета корреляционных функций.

### Некоторые особенности вычисления коэффициентов редукции

1. Для каждого 15-минутного интервала времени выбирался центр дождя — пункт, в котором было зафиксировано максимальное количество осадков. Так как для каждой 15-минутки максимум был разным, в среднем рассчитывались коэффициенты  $k$  относительно блуждающего центра.

2. Если максимальные значения 15-минутных сумм осадков наблюдались в двух и более пунктах, то все операции производились лишь по отношению к одному пункту, выбранному за центр дождя.

3. Частные коэффициенты редукции осреднялись по всему числу случаев 15-минутных интервалов не за каждый месяц отдельно, а за весь исследуемый период времени.

Таблица 2

Коэффициенты редукции 15-минутных сумм осадков по площадям различных радиусов

| р км | Валдай | Дубовка | Велико-Анадоль |
|------|--------|---------|----------------|
| 3    | 0,36   | 0,28    | 0,32           |
| 7,5  | 0,28   | 0,22    | 0,26           |
| 12,5 | 0,22   | 0,17    | 0,19           |
| 17,5 | 0,21   | 0,19    | 0,19           |
| 22,5 | 0,24   | 0,19    | 0,18           |
| 27,5 | 0,26   | 0,15    | 0,18           |
| 32,5 | 0,23   | 0,13    | 0,21           |
| 37,5 | 0,19   | 0,12    | 0,23           |
| 42,6 | 0,18   | 0,11    | 0,19           |
| 47,5 | 0,18   |         | 0,18           |

О том, как меняется величина коэффициента редукции по площади в разных физико-географических районах, можно судить из табл. 2.

В целом наличие убывание  $k$  с увеличением масштаба пространственного осреднения.

При малых радиусах пространственного осреднения 15-минутных сумм осадков относительно центра дождя (6 км) для района Валдая  $k=0,36$ , Велико-Анадоля  $k=0,322$  и Дубовки  $k=0,28$ . Таким образом, относительное убывание слоя осадков по площади происходит в последнем районе интенсивнее, чем в предыдущих двух.

На расстоянии 50 км от центра дождя значения  $k$  в районах Валдая и Велико-Анадоля составляют уже около  $1/2$  величины этого коэффициента, рассчитанного для площади малого радиуса (6 км).

Наиболее быстрое падение величин коэффициента редукции происходит на сравнительно малых расстояниях от центра дождя (до 10 км). Уменьшение коэффициента редукции по мере увеличения радиуса пространственного осреднения может нарушаться. Это происходит, по-видимому, в тех случаях, когда на общий фон поля осадков накладываются вторичные центры. Характерный масштаб таких центров, судя по данным табл. 2, в районах избыточного увлажнения около 10 км, в сухих районах юга — примерно 5 км.

К сожалению, в настоящей работе имеется возможность сравнить коэффициенты редукции сумм осадков по исследуемым районам лишь для площадей, радиус которых не превышает 50 км. Что касается коэффициента редукции для больших площадей, то уже при радиусе осреднения 80—85 км на Валдае его величина составляет 0,11.

Как видно из табл. 3, коэффициент редукции дифференцирован в зависимости не только от площади распространения дождя, но и от слоя осадков в его центре. При увеличении масштабов пространственного осреднения скорость убывания осадков по площади относительно центра дождя уменьшается. При области распространения, близкой к нулю, осадки в центре и на площади почти равны между собой.

Таким образом, подтверждается ряд положений, отмеченных еще З. П. Богомазовой и З. П. Петровой [3, 4], о том, что дожди, выпадающие на сравнительно небольшие площади, характеризуются резким изменением слоя осадков в зависимости от величины площади и, наоборот, при дождях, выпадающих на большую площадь, слой осадков при увеличении площади изменяется мало.

На рис. 4 данные табл. 3 представлены графически. Графики дают соотношение между осадками в центре дождя и осредненными по площадям различных радиусов. Простота графиков достаточно очевидна и способ использования их для практических расчетов не требует пояснений.

Полученные коэффициенты редукции позволяют сделать некоторые выводы относительно погрешностей, возникающих при осреднении по площадям различных радиусов осадков, выпадающих отдельными пятнами. Во время такого осреднения смазываются наиболее важные детали пространственного распределения, а именно: максимумы сглаживаются, а местам фактического отсутствия дождей приписываются кажущиеся осадки.

Как видно из табл. 4, ошибки, возникающие при осреднении максимумов по площади, достигают более 50%.

Таблица 3

Коэффициент редукции 15-минутных сумм осадков  
при различных суммах осадков в центре дождя

| r км | Сумма осадков в центре дождя, мм |         |         |          |       |
|------|----------------------------------|---------|---------|----------|-------|
|      | 0,0—1,0                          | 1,1—2,0 | 2,1—5,0 | 5,1—10,0 | >10,0 |

Валдай

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 3    | 0,43 | 0,40 | 0,37 | 0,31 | 0,27 |
| 7,5  | 0,37 | 0,31 | 0,32 | 0,27 | 0,24 |
| 12,5 | 0,31 | 0,27 | 0,23 | 0,22 | 0,21 |
| 17,5 | 0,28 | 0,28 | 0,25 | 0,20 | 0,19 |
| 22,5 | 0,28 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,22 |
| 27,5 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,25 |
| 32,5 | 0,25 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,21 |
| 37,5 | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,20 | 0,18 |
| 42,5 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,16 |
| 47,5 | 0,20 | 0,19 | 0,17 | 0,17 | 0,16 |

Велико-Анадоль

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 3    | 0,39 | 0,33 | 0,31 | 0,27 | 0,26 |
| 7,5  | 0,36 | 0,31 | 0,29 | 0,25 | 0,21 |
| 12,5 | 0,31 | 0,26 | 0,24 | 0,19 | 0,17 |
| 17,5 | 0,25 | 0,24 | 0,19 | 0,17 | 0,16 |
| 22,5 | 0,23 | 0,22 | 0,18 | 0,19 | 0,14 |
| 27,5 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,14 |
| 32,5 | 0,24 | 0,21 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 37,5 | 0,24 | 0,22 | 0,24 | 0,18 | 0,19 |
| 42,5 | 0,23 | 0,20 | 0,21 | 0,18 | 0,18 |
| 47,5 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,17 | 0,16 |

Дубовка

|      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|
| 3    | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,23 | 0,21 |
| 7,5  | 0,25 | 0,26 | 0,23 | 0,21 | 0,17 |
| 12,5 | 0,23 | 0,22 | 0,16 | 0,15 | 0,14 |
| 17,5 | 0,22 | 0,21 | 0,17 | 0,16 | 0,15 |
| 22,5 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,16 |
| 27,5 | 0,20 | 0,17 | 0,18 | 0,14 | 0,13 |
| 32,5 | 0,19 | 0,17 | 0,14 | 0,12 | 0,11 |
| 37,5 | 0,18 | 0,15 | 0,14 | 0,09 | 0,10 |
| 42,5 | 0,17 | 0,13 | 0,12 | 0,10 | 0,08 |

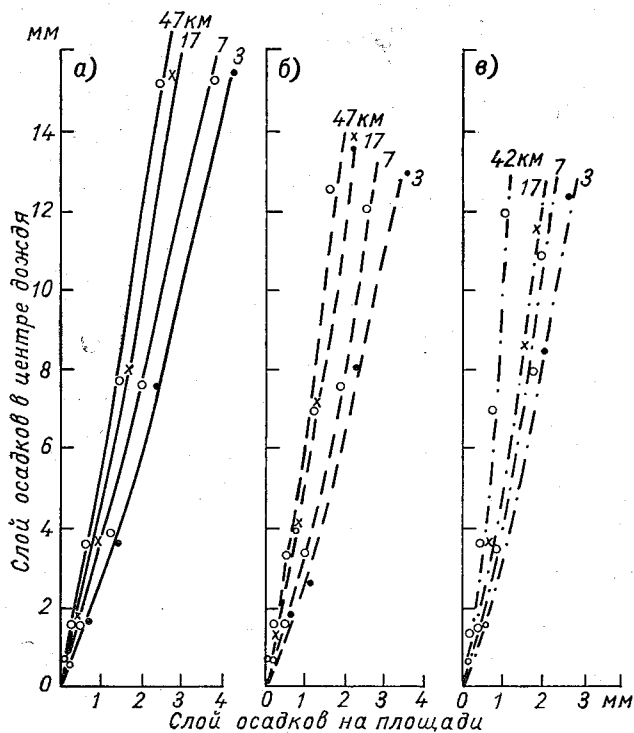


Рис. 4. Связь между слоем осадков в центре дождя и на площади.

а — Валдай, б — Велико-Анадоль, в — Дубовка.

Таблица 4

Ошибки (%) осреднения по площади экстремальных величин 15-минутных сумм осадков (сглаживание максимумов)

| р км | Валдай | Дубовка | Велико-Анадоль |
|------|--------|---------|----------------|
| 3    | 64     | 72      | 68             |
| 7,5  | 72     | 81      | 74             |
| 12,5 | 78     | 81      | 77             |
| 17,5 | 79     | 82      | 77             |
| 22,5 | 80     | 83      | 79             |
| 27,5 | 80     | 85      | 79             |
| 32,5 | 82     | 87      | 81             |
| 37,5 | 84     | 88      | 82             |
| 42,5 | 84     | 89      | 82             |
| 47,5 | 84     |         | 82             |

Дополнительной характеристикой пространственной структуры полей жидких осадков может служить вероятность  $v$  одновременного выпадения осадков в двух пунктах исследуемой территории, удаленных на расстояние  $r$  друг от друга.

Значения  $v$  были вычислены для каждой градации расстояний путем выборки из всего числа частных коэффициентов  $\eta$  случаев, когда  $\eta = 0,50$ , т. е. когда осадки за 15-минутный интервал времени выпадали в центре дождя, но на расстоянии  $r$  км от него отсутствовали. Дополнением к этой характеристике является вероятность выхода за зону дождя по мере удаления от его центра.

Как видно из табл. 5, в целом до расстояний 60—70 км прослеживается увеличение вероятности выхода за зону дождя по мере удаления от его центра. Правда, эта тенденция не непрерывная. В случае, когда происходит чередование очагов осадков, т. е. когда чередуются зоны с осадками и бездождные зоны,  $v$  начинает расти.

Таблица 5

Вероятность  $v$  % одновременного выпадения осадков в центре дождя и на станции, удаленной на расстояние  $r$  км

| Станция        | Расстояние от центра дождя, км |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|----------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                | 1—10                           | 11—20 | 21—30 | 31—40 | 41—50 | 51—60 | 61—70 | 71—80 | 81—90 | 91—100 |
| Валдай         | 60                             | 47    | 40    | 36    | 41    | 31    | 32    | 41    | 59    | 63     |
| Дубовка        | 61                             | 52    | 56    | 48    | 29    | 27    |       |       |       |        |
| Велико-Анадоль | 59                             | 44    | 39    | 38    | 24    | 25    |       |       |       |        |

Уменьшение на Валдае вероятности выхода за зону дождя по мере удаления от его центра на расстояние более 70 км говорит о том, что здесь происходит чередование крупных зон осадков, каждая из которых в свою очередь состоит из очагов повышенного и пониженного количества осадков.

Представляет интерес сравнить вероятности одновременного выпадения в двух пунктах, удаленных друг от друга на расстояние  $r$ , сумм осадков, осредненных за 15-минутные интервалы (табл. 5), с этими же характеристиками, рассчитанными Р. Л. Каганом [8] для полусуточных интервалов времени, значения которых приводятся ниже:

|        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $r$ км | 0    | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  |
| $v$    | 1,00 | 0,85 | 0,78 | 0,74 | 0,72 | 0,70 | 0,69 | 0,68 | 0,67 | 0,66 | 0,65 |

Данные относятся к центральным областям ЕТС, занимающим некоторое промежуточное географическое положение между районами Валдая и Велико-Анадоль.

Поскольку значения вероятности одновременного выпадения 15-минутных сумм осадков в двух пунктах, расположенных на территории Валдая и Велико-Анадоля (табл. 5), для большей части сравниваемых градаций одного порядка, можно предположить, что и для Центральных областей порядок этих величин сохранится. Значения же вероятностей одновременного выпадения полусуточных сумм осадков в двух пунктах на территории Центральных областей, естественно, существенно больше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алибегова Ж. Д. К вопросу о структуре полей осадков на Украине. Труды ГГО, вып. 222, 1968.
2. Анчугова Р. И., Морозова Т. И. О временной и пространственной изменчивости ливневых осадков по данным радиолокационных наблюдений. Труды ГГО, вып. 186, 1966.
3. Богомазова З. П., Петрова З. П. Исследование выдающихся дождей северо-западного района Европейской территории СССР и их зависимость от площади распространения. Труды ГГИ, вып. 55, 1947.
4. Богомазова З. П., Петрова З. П. Исследование выдающихся дождей на территории УССР, их хода, распределения по площади. Труды ГГИ, вып. 6 (60), 1948.
5. Гущина М. В., Каган Р. Л. О статистической структуре поля осадков. Труды ГГО, вып. 191, 1966.
6. Голубев В. С., Зотимов Н. В., Зыков И. А. Некоторые результаты исследований жидких осадков в районе Валдайской возвышенности. Труды ГГИ, вып. 123, 1965.
7. Дроздов О. А. О некоторых особенностях полей метеорологических элементов. Труды ГГО, вып. 19 (81), 1950.
8. Каган Р. Л. О редукции метеорологических элементов на площади. Труды ГГО, вып. 191, 1966.
9. Козлов М. П., Зыков Н. А. О точности вычислений и изменчивости средних величин летних осадков по заданной площади. Труды ГГИ, вып. 46 (100), 1954.
10. Полищук А. И., Каган Р. Л. О статистической структуре осредненных значений метеорологических элементов. Труды ГГО, вып. 191, 1966.
11. Сиротенко О. Д. Использование данных об осадках в статистических схемах для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Метеорология и гидрология, № 9, 1967.
12. Holland. The Cardington rainfall experiment. The meteorological magazine. No. 1140, vol. 96. July 1967. Her Majesty's Stationary Office.
13. Imai I., Suzuki, E. Izawa T., Kurashige K. Aoyagi I., Imanase T., and Hayashi K. Statistical Properties of Rainfall and the Radiowave Attenuation Due to Rain. Journal of Meteorological Research. vol. 16. No. 3, 1964.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| С. М. Персин. Об оптимальном выборе методов получения и обработки дискретных отсчетов метеорологических процессов . . . . .                                                                 | 3   |
| С. М. Персин. Об оптимальных характеристиках квантования по уровню . . . . .                                                                                                                | 28  |
| Д. П. Беспалов, Т. П. Грибова, Т. П. Светлова. Методика получения характеристик полей средних месячных значений основных метеорологических элементов . . . . .                              | 39  |
| Л. Ф. Школяр. Применение уравнений регрессии для контроля данных наблюдений над влажностью воздуха на станциях, расположенных в горных районах и в районах с редкой сетью станций . . . . . | 47  |
| И. Д. Копанев. Оценка точности определения характеристик снежного покрова и рекомендации по рационализации снегомерной сети . . . . .                                                       | 54  |
| И. Г. Горбунова. Возможность применения дождемера О-1М в качестве эталонного (наземного) и сетевого прибора . . . . .                                                                       | 64  |
| И. А. Покровская, Г. И. Полухин, В. А. Парнищев, Н. П. Фатеев. Эталонные барометры Гидрометслужбы СССР . . . . .                                                                            | 68  |
| Г. П. Резников. Динамический режим поверки первичных измерительных преобразователей с большой постоянной времени . . . . .                                                                  | 82  |
| Г. П. Резников, Н. П. Фатеев. Использование абсолютных методов измерений для передачи размеров единиц метеорологических величин на сеть . . . . .                                           | 85  |
| Г. П. Резников. Модель естественной классификации методов измерения влажности газов . . . . .                                                                                               | 90  |
| В. А. Клеванцова. Оценка случайных погрешностей пиргелиметрических измерений . . . . .                                                                                                      | 99  |
| И. Г. Горбунова. О погрешностях измерения осадков осадкомерами Гельмана . . . . .                                                                                                           | 102 |
| Л. Р. Струзер. О применении наземных дождемеров для измерения количества жидких осадков . . . . .                                                                                           | 115 |
| Л. Р. Струзер. О необходимости строгого контроля горизонтальности приемного отверстия осадкомера . . . . .                                                                                  | 128 |
| Л. Р. Струзер. К вопросу об определении увлажнения горных склонов . . . . .                                                                                                                 | 134 |
| С. А. Смирнов. К постановке наблюдений над гололедно-изморозевыми явлениями . . . . .                                                                                                       | 150 |
| В. Я. Ипатов, И. Н. Нечаев. Приспособление для установки осадкомера на высоте 10 м над поверхностью земли . . . . .                                                                         | 156 |
| Л. Р. Струзер, Э. Г. Богданова. К вопросу о надежности расчетов количества ложных осадков, попадающих в осадкомер во время метелей . . . . .                                                | 163 |
| Ц. А. Швер. О корректировке рядов дождемерных наблюдений коэффициентами, принятыми для норм . . . . .                                                                                       | 175 |
| Л. Р. Струзер, И. Н. Нечаев. Определение среднего многолетнего дефицита влажности воздуха в дни с осадками . . . . .                                                                        | 180 |
| Л. В. Дубровин. К расчету величин теплового потока в почву . . . . .                                                                                                                        | 189 |
| Ж. Д. Алибегова. Пространственная структура поля сумм осадков, осредненных по 15-минутным интервалам . . . . .                                                                              | 195 |

**Об оптимальном выборе методов получения и обработки дискретных отсчетов метеорологических процессов.** Персин С. М. Труды ГГО, 1972, вып. 280, стр. 3—27.

В статье рассматривается вопрос об оптимальном выборе способа осреднения при получении отсчета и обработки результатов дискретных отсчетов метеорологических процессов, а также необходимой точности отсчетов, частоты измерений, расположения отсчетов и т. п. Указывается на связь рассматриваемой задачи с вопросом о репрезентативности метеорологических измерений. Подробно исследуются погрешности различных методов воспроизведения процесса по одному и двум отсчетам осредняющего прибора (главным образом аperiodического прибора первого порядка). Предполагается простой метод уменьшения погрешности линейной интерполяции по отсчетам аperiodического прибора.

Илл. 3. Библ. 11.

**Об оптимальных характеристиках квантования по уровню.** Персин С. М., Труды ГГО, 1972, вып. 280, стр. 28—38.

При неравномерном распределении измеряемой величины или различных требованиях к абсолютной погрешности в разных точках шкалы целесообразно использовать нелинейную шкалу квантования по уровню, что позволяет повысить точность при том же числе уровней (квантов). В статье предлагается способ простого нахождения шкалы квантования, близкой к оптимальной, при заданных требованиях к точности и распределениях измеряемого сигнала и случайной погрешности и при достаточно большом числе квантов. Получены такие выражения для шкалы, оптимальной с точки зрения количества получаемой информации (при известных распределениях сигнала и помехи), и рассмотрен приближенный способ нахождения количества информации при неравномерном квантовании.

Илл. 2. Библ. 9.

**Методика получения характеристик полей средних месячных значений основных метеорологических элементов.** Беспалов Д. П., Грибова Т. П., Светлова Т. П. Труды ГГО, 1972, вып. 280, стр. 39—46.

В связи с тем что потребителей чаще интересуют данные о гидрометеорологическом режиме не в самой точке наблюдений, а на территории в некотором удалении от пункта наблюдения, вопросы пространственной интерпретации сетевых наблюдений в виде полей элементов приобретают особую значимость. Рассматриваются значения характеристик поля основных метеорологических элементов, полученные с помощью ЭВМ Минск-22 для окрестностей станций Белорусского территориального гидрометцентра.

Табл. 1. Илл. 6. Библ. 3.