

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии

Труды
ордена Трудового Красного Знамени
Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова

Выпуск 523

МЕТОДИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Под редакцией
канд. техн. наук Е.В.Романова
и канд. геогр. наук Т.П.Светловой



Ленинград Гидрометеоиздат 1989

06
778

УДК 551.501

Рассматриваются вопросы развития методики и технических средств обеспечения метеорологических наблюдений с учетом задач их автоматизации: метеорологическое обеспечение воздушного движения и дальнейшее совершенствование алгоритмов контроля и обработки метеорологической информации; исследование погрешностей, возникающих при наблюдениях за различными метеорологическими величинами; требования к приборам и оборудованию, используемым для наблюдений и метеообеспечения авиации.

Сборник рассчитан на специалистов управлений по гидрометеорологии, а также преподавателей и студентов вузов и техникумов по специальности метеорология и метеорологические измерения.

The publication deals with the problems of developing procedures and technique for supporting meteorological observations with due regard for their automation.

The questions are examined concerning air traffic meteorological support and further improvement of the algorithms for checking and processing meteorological information. Results are presented of studying errors that arise in observations of different meteorological parameters, as well as requirements for instruments and equipment applied to observations and meteorological support of aviation.

The publication is meant for specialists of regional administrations for hydrometeorology and control of natural environment, as well as for teachers and students specializing in meteorology and meteorological measurements.

Гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
105108 Малохватский пр., 10

М I805040400-018 47-88(I)
069(02)-89

ISBN 5-286-00485-7

© Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова (ИГО), 1989.

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТЕООБОРУДОВАНИЮ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОМУ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТЕОИНФОРМАЦИИ,
НЕОБХОДИМОЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА АЭРОДРОМАХ ГА

Посадка воздушного судна при метеоусловиях, близких к минимуму, может быть успешной, если:

- пилот этого воздушного судна уверенно обнаружит взлетно-посадочную полосу (ВПШ) хотя бы на уровне порогового контраста на расстоянии, равном или большем установленного минимума по дальности видимости, и в процессе посадки до приземления сохранит визуальный контакт с ВПШ;

- высота принятия решения на посадку будет равна или больше 0,75 фактической высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости) /1/;

- воздействие ветра на воздушное судно при приземлении не создает опасной ситуации;

- на линии глиссады не будет опасных для авиации метеорологических явлений /2/ (гроза, град, ледяной дождь, шквал, смерч, умеренное и сильное обледенение, гололед, сильная болтанка, сильный и очень сильный сдвиг ветра).

Успешный взлет воздушного судна при значениях метеовеличин, близких к минимуму, возможен тогда, когда при разбеге и отрыве воздушного судна от ВПП пилот его не утратит визуального контакта с ориентирами (огнями), ограничивающими ВПП; воздействие ветра на воздушное судно не создаст опасной ситуации; при взлете и наборе высоты не встретятся опасные для авиации метеорологические явления (гроза, град, ледяной дождь, шквал, смерч, умеренное и сильное обледенение, сильная болтанка, сильный и очень сильный сдвиг ветра). Выполнение этих условий возможно, если пилот воздушного судна и диспетчеры управления движением самолетов заблаговременно получают достоверную информацию о следующих метеорологических величинах и явлениях:

- дальности видимости на ВПП (желательно о дальности посадочной видимости или наклонной дальности видимости) и метеорологической дальности видимости;

- высоте нижней границы облаков (вертикальной видимости) и их количестве;

- параметрах ветра;

- атмосферном давлении (давлении на ВПП);
- температуре и влажности воздуха;
- местоположении и интенсивности опасных для авиации метеорологических явлений (грозы, града, ледяного дождя, шквала, смерча, умеренного и сильного обледенения, гололеда, сильной болтанки, сильного и очень сильного сдвига ветра).

Получение перечисленного выше состава метеоинформации с необходимой заблаговременностью и достоверностью возможно, если метеоснабжение аэродромов будет удовлетворять требованиям, изложенным ниже /3/.

I. Требования к измерителям (регистраторам) дальности видимости

Чтобы знать расстояние, с которого пилот воздушного судна, производящего посадку, уверенно обнаружит ВПП и до посадки не утратит визуальный контакт с ней, необходима информация о посадочной дальности видимости. Посадочная дальность видимости - максимальное расстояние, с которого пилот воздушного судна, находящегося на линии глиссады, уверенно обнаружит ВПП при конкретных яркостных характеристиках ВПП (маркировка, огни), фона и состояния атмосферы по линии глиссады.

Предпринятые попытки определения посадочной дальности видимости, например, по метеорологической дальности видимости, коэффициенту видимости ВПП, отношению яркости дымки (тумана) в слое, равном дальности видимости, к яркости ВПП /4/; по уравнениям дальности видимости /5/; послойному определению среднего показателя ослабления с некоторой дискретностью с помощью ЭВМ метеорологических измерительных систем /6/; по градиентным измерениям прозрачности с помощью нефелометров, устанавливаемых на различных высотах /7/, практического применения не получили.

Не производится определения (измерения) наклонной дальности видимости, которая могла бы быть более близкой к посадочной дальности видимости, хотя был предложен ряд методов определения ее (например, по результатам зондирования лучом света под некоторым углом /8/), оценен необходимый угол зондирования /9/ и ведутся опытно-конструкторские работы по созданию технических средств.

В последние годы в практику метеорологического обеспечения взлета и посадки воздушных судов гражданской авиации введена выдача информации о дальности видимости на ВПП /1, 2/ и метеорологической дальности видимости. Дальность видимости на ВПП - макси-

мальное расстояние, с которого пилот воздушного судна, находящегося над осевой линией ВПП, может видеть маркировку покрытия ВПП или огни, обозначающие контуры ВПП и ее осевую линию. Метеорологическая дальность видимости (МДВ) – максимальное расстояние, на котором в светлое время суток под воздействием атмосферной дымки (тумана) утрачивается восприятие черной поверхности с угловыми размерами $15 \times 15''$ /3/.

Дальность видимости на ВПП является одним из наиболее важных элементов метеоинформации, необходимой при обеспечении взлета и посадки воздушных судов. По дальности видимости на ВПП и высоте принятия решения устанавливаются минимумы командира воздушного судна, аэродрома и воздушного судна /1/. Например, для аэродромов, обеспечивающих посадку по минимуму I категории, установлена дальность видимости на ВПП 800 м, высота принятия решения 60 м; II категории – дальность видимости на ВПП от 800 до 400 м, высота принятия решения от 60 до 30 м; III категории – дальность видимости на ВПП менее 400 м, высота принятия решения менее 30 м. При МДВ более 2000 м метеоусловия считаются простыми /1/.

Практически дальность видимости на ВПП не может быть измерена непосредственно на ВПП, она не может быть результатом наблюдения или измерения, как, например, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Она является результатом оценки, основанной на расчетах, учитывающих различные факторы, в том числе атмосферные (коэффициент пропускания на определенной базе или метеорологическую дальность видимости, освещенность, силу света огней ВПП или контрастность маркировки поверхности ВПП).

Коэффициент пропускания атмосферы на определенной базе подвержен значительным изменениям во времени (флуктуации) и в пространстве, причем чем меньше длина измерительной базы, тем больше флуктуации. Кроме того, длина измерительной базы всегда меньше измеряемой дальности видимости. В результате этого дальность видимости на ВПП, выдаваемая в метеоинформации на посадку, не совпадает с дальностью видимости, определяемой пилотом воздушного судна при посадке /10/.

Исходя из вышеизложенного, технические средства, предназначенные для определения дальности видимости на ВПП и метеорологической дальности видимости, должны обеспечивать:

- определение (вычисление) дальности видимости на ВПП в диапазоне от 50 до 2000 м. Предел допускаемой погрешности определения дальности видимости на ВПП должен быть не более: 25 м в диапазоне до 150 м; 50 м в диапазоне от 150 до 500 м; 100 м в диа-

пазоне от 500 до 1000 м и 200 м в диапазоне от 1000 до 2000 м;

- округление вычисленных значений дальности видимости на ВПП в сторону наименьшего значения, кратного: 25 м при дальности видимости на ВПП до 150 м; 50 м при дальности видимости на ВПП от 150 до 800 м; 100 м при дальности видимости на ВПП от 800 до 1200 м и 200 м при дальности видимости на ВПП более 1200 м /II/. Округленная в сторону наименьшего значения информации о дальности видимости на ВПП с большей вероятностью свидетельствует, что дальность видимости на ВПП при посадке или взлете будет не меньше выданного значения.

Технические средства для определения (вычисления) дальности видимости на ВПП должны состоять из средств измерения коэффициента пропускания в определенном слое атмосферы или метеорологической дальности видимости и дальности видимости огня, средств измерения освещенности, вычислителей дальности видимости на ВПП. Технические средства для определения дальности видимости на ВПП должны удовлетворять следующим требованиям:

- измерители коэффициента пропускания должны обеспечивать измерение коэффициента пропускания (прозрачности) в слое, соответствующем длине базы, в диапазоне от 5 до 90 % с общей погрешностью не более 3 %, производить скользящее осреднение (сглаживание) измеренных значений за период от 30 до 60 с;

- измерители метеорологической дальности видимости должны обеспечивать измерение МДВ в диапазоне от 20 до 2000 м с относительной приведенной погрешностью не более 15 % в диапазоне от 20 до 250 м и 10 % в диапазоне от 250 до 2000 м;

- измерители яркости фона должны обеспечивать измерение яркости фона в диапазоне от 4 до 12 000 кд на 1 кв. м с относительной приведенной погрешностью не более 10 %;

- вычислительные устройства для вычисления дальности видимости на ВПП должны обеспечивать автоматический прием сигналов от средств измерения вышеуказанных параметров, производить вычисление дальности видимости на ВПП с учетом силы света включенных на ВПП огней, производить округление вычисленных значений дальности видимости на ВПП и выдавать на средства отображения не менее трех значений дальности видимости на ВПП. Относительная погрешность приема и обработки сигналов и вычисления дальности видимости на ВПП вычислительного устройства не должна превышать 5 %.

Желательно, чтобы вычислительные устройства для вычисления дальности видимости на ВПП могли при вычислении дальности видимости на ВПП учитывать следующие факторы:

- порог освещенности глаза с учетом условий наблюдения, в котором находится пилот воздушного судна;
- влияние остекления кабины воздушного судна на видимость ВП;
- суммарный эффект ряда огней, вызванный их слипанием из-за интервалов и углов, под которыми они наблюдаются.

2. Требования к измерителям (регистраторам) высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости)

Информация о количестве и высоте нижней границы облаков (ВНГО), а в тумане и сильных осадках о вертикальной видимости (ВВ) имеет важное значение при обеспечении посадки воздушных судов, так как высота установления визуального контакта пилота воздушного судна зависит от ВНГО (ВВ). Поэтому в минимумы командира воздушного судна, аэродрома и воздушного судна вместе с дальностью видимости на ВПП входит высота принятия решения или высота нижней границы облаков /1/. Высота принятия решения при посадке по минимуму III категории менее 30 м (нижний предел диапазона измерения). При высоте нижней границы облаков 200 м и более метеослужбия считается простыми /1/.

Высота нижней границы облаков - расстояние по вертикали между поверхностью суши (воды) и нижней границей самого низкого слоя облаков /1, 2/. Нижняя граница облаков имеет сложную структуру и представляет собой переходный слой переменной оптической плотности. Плотной части облака предшествует предоблачный слой. Предоблачный слой слоистых облаков может иметь толщину 200 м. Колебания высоты нижней границы облаков достигают 100 м и более /12/.

При тумане или сильных осадках предоблачный слой распространяется до поверхности земли (воды), при этом плотность их с высотой увеличивается даже тогда, когда их структура по площади остается одинаковой /12/. Поэтому при тумане и сильных осадках должна измеряться не высота нижней границы облаков, а вертикальная видимость. Вертикальная видимость - максимальное расстояние от поверхности земли до уровня, с которого вертикально вниз видны объекты на земной поверхности /2/. Измеряемая с помощью ИВО (РВО-2) /2/ вертикальная видимость не соответствует вышеизложенному определению, так как она является высотой светового пятна, имеющего яркость, соответствующую пороговой чувствительности приемника.

Большая изменчивость высоты нижней границы облаков (верти-

кальной видимости) во времени и в пространстве /I3/ приводит к тому, что информация о ВНГО и вертикальной видимости, полученная по единичным измерениям с помощью ИВО (РВО-2), как правило, не совпадает с высотой нижней границы облаков (вертикальной видимостью) или высотой принятия решения на посадку, определяемой пилотом воздушного судна /I4/. Кроме того, при обеспечении посадки по минимумам II и III категорий, когда информация о высоте нижней границы облаков (вертикальной видимости) обновляется каждую минуту, информацию о них, полученную по единичным измерениям, использовать невозможно, особенно при значениях, близких к высоте принятия решения на посадку.

Исходя из вышеизложенного средства измерения высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости) должны обеспечивать:

- непрерывные измерения ВНГО (ВВ) с временным интервалом не более 10 с со скользящим осреднением и выдачей минимального значения за один из 1, 2, 3, 4 и 5-минутных интервалов времени;
- измерение ВНГО (ВВ) в диапазоне от 15 до 1000 м с пределом допускаемой погрешности: 15 м в диапазоне от 15 до 150 м; $(10 + 0,07h)$ м в диапазоне от 150 до 500 м; $(10 + 0,1h)$ м в диапазоне от 500 до 1000 м, где h - высота нижней границы облаков.

3. Требования к измерителям (регистраторам) параметров ветра

Скорость и направление ветра являются важными метеорологическими элементами при оценке метеорологической ситуации для захода на посадку, для посадки, пробеге и руления воздушного судна, а также для разбега, отрыва от ВПП и для высоты набора.

При определенных значениях скорости и направления ветра, превышающих установленный минимум командира воздушного судна или воздушного судна, ветер рассматривается опасным для авиации метеорологическим явлением. По скорости и направлению ветра определяется рабочий курс аэродрома.

Влияние приземного ветра на посадку и взлет воздушного судна зависит от скорости и направления ветра относительно курса посадки и взлета или относительно ВПП. Максимально допустимая скорость бокового ветра для большинства воздушных судов гражданской авиации ограничивается 12 м/с при хорошем сцеплении с ВПП (сухая ВПП). При посадке на мокрую ВПП максимально допустимая скорость бокового ветра снижается до 8 м/с, а при гололеде - до 3 м/с.

Ограничений по встречному ветру при посадке и взлете тяжелых

воздушных судов практически нет, но с увеличением скорости ветра, как правило, усиливается турбулентность. Ограничения по встречному ветру для легких воздушных судов зависят от максимальной посадочной скорости. Попутный к курсу взлета и посадки воздушного судна ветер увеличивает длину его разбега или пробега, увеличивает силу удара приземляющегося воздушного судна о ВПП. Максимально допустимая скорость попутного ветра, как правило, не превышает 5 м/с /9/.

Следовательно, для исключения опасных воздействий приземного ветра на воздушное судно при взлете его или приземлении необходима информация о векторе ветра относительно ВПП или о перпендикулярной составляющей к ВПП скорости ветра и направлении относительно истинного ветра (или магнитного, если магнитное склонение на аэродроме составляет 10° и более).

Турбулентный характер ветра в приземном слое атмосферы обуславливает сложную картину пространственно-временной изменчивости параметров ветра. В целях получения более объективной информации о параметрах ветра, необходимой для обеспечения взлета и посадки воздушных судов, измерение параметров ветра следует производить на высоте не менее 6 м от поверхности земли (6-10 м) и в местах, по возможности максимально приближенных к точкам приземления и взлета воздушных судов.

Турбулентный характер ветра в приземном слое по внешней форме проявления представляет собой случайный процесс /15/, для описания которого статистический подход оказывается наиболее рациональным. Ветровое поле разделяется на поле средних значений и поле пульсаций мгновенных значений относительно среднего уровня. Практически необходимо обеспечить измерение средних во времени значений скорости и направления ветра, а также максимальных порывов мгновенной скорости ветра.

Для оперативного метеорологического обеспечения посадки воздушного судна информация о параметрах ветра должна быть репрезентативной на период посадки и пробега, взлета — на период руления, разбега и взлета (около 2 мин). Для приема воздушных судов, находящихся на трассе, информация о параметрах ветра должна быть репрезентативной на период подхода к аэродрому и захода на посадку (на период времени от 10 до 30 мин). Исходя из этого рекомендованы следующие временные интервалы осреднения:

- 2-минутный интервал осреднения скорости ветра в информации, предназначенной для обеспечения взлета и посадки воздушных судов;

- 10-минутный интервал осреднения скорости ветра в информации, предназначенной для обмена между аэродромами и передачи экипажам воздушных судов, находящихся на маршрутах /16/;

- 2-минутное осреднение направления ветра;

- выбор максимального значения скорости ветра за 10-минутный интервал времени во всех видах передаваемой информации о параметрах ветра /32/.

Максимальные значения скорости ветра должны осредняться за интервал времени от 2 до 5 с /16, 17/.

Исходя из вышеизложенного измерители (регистраторы) параметров ветра должны обеспечивать:

- измерение мгновенной скорости ветра ($V_{\text{мгн}}$), осредненной за счет инерции измерительной схемы, за период от 2 до 5 с в диапазоне от 1 до 55 м/с с погрешностью не более $\pm(0,5+0,05 V_{\text{мгн}})$ м/с;

- измерение направления ветра, осредненного за 1 мин, в диапазоне от 0 до 360° с погрешностью $\pm 8^{\circ}$;

- скользящее осреднение (сглаживание) скорости ветра ($V_{\text{ср}}$) в диапазоне от 1 до 40 м/с с погрешностью $\pm(0,5+0,05 V_{\text{ср}})$ м/с;

- скользящий выбор максимальной скорости ветра ($V_{\text{макс}}$) в диапазоне от 3 до 60 м/с с погрешностью $\pm(1,0+0,07 V_{\text{макс}})$ м/с;

- порог чувствительности первичного измерительного преобразователя параметров ветра должен быть по скорости ветра не более 0,6 м/с;

- должна быть обеспечена установка первичного измерительного преобразователя параметров ветра на мачте высотой от 6 до 10 м.

Распределение ветра в приземном слое атмосферы (до высоты 100 м) оказывает существенное влияние на воздушное судно, производящее взлет или посадку. Имея малое время, ограниченный запас высоты, скорости, приемистость двигателей, пилот воздушного судна не всегда может своевременно парировать влияние резкого изменения ветра, т.е. сильный и очень сильный сдвиг ветра. Опасными для современных воздушных судов считаются сдвиги, превышающие 4 м/с на 30 м высоты (сильные и очень сильные) /12/.

Сдвиг ветра - это изменение ветра в пространстве, описываемое векторной разностью скоростей, между двумя точками. В зависимости от расположения этих точек различают вертикальный сдвиг ветра (изменение горизонтальной составляющей ветра по вертикали), горизонтальный сдвиг ветра (изменение горизонтальной составляющей ветра на заданной высоте), а также сдвиг ветра в заданном направлении в пространстве (например, вдоль траектории движения воздуш-

ного судна - линии глиссады). Кроме того, в нижних слоях атмосферы встречаются зоны восходящих или нисходящих потоков, которые в отличие от турбулентности, вызывающей болтанку воздушных судов, имеют большую протяженность и приводят соответственно к подъему или опусканию воздушного судна в полете в течение десятков секунд и более /18/.

Наибольшие вертикальные сдвиги ветра наблюдаются в слое от земли до 50 м, причем сильные и очень сильные встречаются соответственно в 3 и 0,5 % случаев, а сильные горизонтальные сдвиги ветра - в 0,1 % случаев. Вертикальные потоки воздуха в 100-м слое над поверхностью земли могут достигать 10 м/с /18/.

В связи с опасностью, которую представляют сдвиги ветра в приземном слое (50-100 м) от поверхности земли, в материалах ИКАО /19/ даны требования к информации о сдвигах ветра, которая должна заблаговременно передаваться пилоту воздушного судна, производящего взлет или посадку. Рекомендованы следующие численные критерии качественных характеристик сдвига ветра на 30 м высоты: слабый - от 0 до 2 м/с, умеренный - от 2 до 4 м/с, сильный - от 4 до 6 м/с, очень сильный - более 6 м/с.

По направлению воздействия рекомендована передача следующей информации о сдвигах ветра:

- отрицательный - компонента сдвига ветра направлена противоположно направлению курса полета воздушного судна;
- положительный - компонента сдвига ветра по направлению совпадает с курсом полета воздушного судна;
- левый - компонента сдвига ветра направлена поперек курса полета влево от направления движения воздушного судна;
- правый - компонента сдвига ветра направлена поперек курса полета вправо от направления движения воздушного судна.

В настоящее время нет технических средств, которые могли бы надежно измерять параметры ветра в слое от земли до высоты 100 м вдоль линии глиссады или по траектории взлета воздушного судна. Оперативно используемые на аэродромах средства прямых измерений параметров ветра (основные - на высоте 6-10 м и дополнительные - на высоте 30 м и более, шаропилотные), позволяют производить измерения на некотором удалении от линии глиссады или траектории взлета воздушного судна и лишь частично удовлетворяют требованиям обеспечения безопасности посадки и взлета воздушных судов по воздействию сдвигов ветра.

Исследования сдвигов ветра и турбулентности в нижнем 300-метровом слое атмосферы /20/ показали, что сдвиги ветра в призем-

ном слое носят локальный и кратковременный характер. Поэтому для получения достоверной информации о сдвигах ветра и турбулентности, которые может встретить воздушное судно при взлете и посадке, необходимы технические средства, позволяющие обнаруживать сдвиги ветра и турбулентность на линии глиссады и по траектории взлета воздушного судна и в районе аэродрома.

4. Требования к измерителям атмосферного давления

Информация об атмосферном давлении (давлении на аэродроме /I/) при обеспечении взлета и посадки воздушных судов необходима для определения высоты воздушного судна, так как основным навигационно-пилотажным прибором на воздушном судне является барометрический высотомер, показания которого выставляются по атмосферному давлению, измеренному органами метеослужбы на аэродроме взлета при взлете и на аэродроме посадки при посадке воздушного судна /I/.

Давление на аэродроме — атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба или в гектопаскалях (гПа) на уровне ВПП.

При посадке воздушного судна на конечном этапе (при высоте 150 м и менее) высота воздушного судна определяется по радиовысотомеру с установкой сигнализатора радиовысотомера на определенную высоту (согласно руководству по летной эксплуатации /I/). Поэтому, учитывая изменение атмосферного давления на 1 гПа на 10 м высоты в приземном слое атмосферы (барометрическая ступень), измерение атмосферного давления с пределом допускаемой погрешности 0,5 гПа (мм рт.ст.) можно считать вполне допустимым.

Для анализа поля давления по площади используется атмосферное давление, приведенное к единому уровню — уровню моря. Атмосферное давление, приведенное к уровню моря, используется в информации, применяемой для обмена между аэродромами.

Атмосферное давление на уровне моря изменяется в пределах от 880 до 1080 гПа /2I/. Следовательно, верхним пределом измерения атмосферного давления следует считать 1080 гПа. При определении нижнего предела измерения атмосферного давления необходимо учитывать наличие высокогорных аэродромов, где атмосферное давление может понижаться до 600 гПа.

Во времени атмосферное давление изменяется в среднем на $\pm 0,5$ гПа за 1 ч, максимальные изменения атмосферного давления за 1 ч могут достигать 4 гПа.

Исходя из вышеизложенного, измерители атмосферного давления должны удовлетворять следующим требованиям:

- диапазон измерения атмосферного давления от 580 до 1080 гПа;
- предел допускаемой погрешности измерения атмосферного давления 0,5 гПа, инструментальной - 0,35 гПа;
- значение вариаций при постоянном давлении не более 0,05 гПа;
- температурный коэффициент компенсации первичного измерительного преобразователя атмосферного давления не более 0,005 гПа на 1 °С;
- цена деления шкалы не менее 0,1 гПа, а при цифровой индикации - до первого знака после запятой.

5. Требования к измерителям температуры и влажности воздуха

Температура воздуха оказывает незначительное влияние на взлетные и посадочные характеристики воздушных судов. Только значительные повышения температуры воздуха приводят к увеличению длины разбега и скорости отрыва воздушного судна, к увеличению посадочной скорости и длины пробега. У большинства воздушных судов с реактивными двигателями на каждые 10 °С повышения температуры воздуха при неизменных оборотах двигателей длина разбега увеличивается на 13 %, длина пробега - на 3,5 % /12/. Следовательно, измерение температуры воздуха с точностью ± 1 °С, с точки зрения потребностей непосредственного обеспечения авиации информацией о температуре воздуха, можно считать вполне допустимым.

Диапазон измерения температуры воздуха определяется значениями ее, которые наблюдаются на территории СССР. Ниже -70 °С и выше +50 °С температура воздуха на территории СССР не наблюдается /21/.

Влажность воздуха непосредственного влияния на взлет и посадку воздушных судов, за исключением вертолетов, не оказывает. Но информация о влажности воздуха является одним из важных исходных данных для предупреждения о возникновении таких опасных для авиации метеорологических явлений, как туман, дымка и низкая облачность.

Наиболее удобным термогигрометрическим параметром для предупреждения о возникновении тумана, усилении дымки и понижении облачности является точка росы или дефицит точки росы. Точка росы -

скоростями ветра и перепадом давления.

Шквал — резкое кратковременное усиление ветра, сопровождающееся изменением его направления. Скорость ветра при шквале часто превышает 20–30 м/с.

Для обеспечения безопасности взлета и посадки воздушных судов очень важна информация о наличии и местоположении кучево-дождевых облаков, гроз, смерчей и шквалов в районе аэродрома и их интенсивности, особенно по курсу полета и линии глиссады при заходе на посадку и посадке, а также по траектории взлета и набора высоты.

Технические средства (метеорологические радиолокаторы), предназначенные для обнаружения кучево-дождевых облаков и гроз, должны удовлетворять следующим требованиям /3/:

- метеорологические радиолокаторы должны обеспечивать обнаружение и определение местоположения кучево-дождевых облаков и осадков обложного характера; определять верхние границы и горизонтальные размеры облаков и площадей осадков; определять скорость и направление перемещения облаков и осадков, определять интенсивность и эволюцию кучево-дождевых облаков;

- метеорологический потенциал метеорологических радиолокаторов на диапазонах волн от 0,03 до 0,11 м должен быть не менее 270 дБ; должна быть обеспечена зона обзора по азимуту 360° , по углу места — от 1° до 95° ; скорость обзора по азимуту должна быть от 0,5 до 36° в секунду, а длительность одного цикла обзора по углу места от 18 до 80 с;

- предел допускаемой относительной погрешности измерения наклонной дальности в зависимости от выбранного масштаба на индикаторе кругового обзора (ИКО) и индикаторе "дальность — высота" (ИДВ) с помощью дальномерного устройства должен быть не более 1 %; предельное отклонение линии развертки индикаторов от оси диаграммы направленности антенны должно быть не более 3° ; погрешность коррекции мощности отраженных сигналов на расстоянии должна быть не более 3 дБ;

- динамический диапазон приемного устройства должен быть не менее 70 дБ;

- предел допускаемой погрешности измерения мощности отраженных сигналов, определяемый как разность между измеренным ослаблением мощности входного сигнала и значением соответствующей ступени ИЗОЭХА, не должен превышать по абсолютному значению 3 дБ;

- основные масштабы индикаторов, в том числе выносных, должны быть: ИКО — 25, 50, 100, 300 км; ИДВ — 12,5, 25, 50, 100 км;

- желательно обеспечить встроенный контроль работоспособности и определение блока, в котором произошел отказ; герметизацию волноводных трактов для защиты от пыли и влаги; вращение антенны без радиопрозрачного ветрового укрытия при скорости не менее 17 м/с; регистрацию индикаторов (ИКО и ИДВ), даты и времени наблюдений, при этом срок наблюдений не должен увеличиваться более чем на 2-3 мин; обеспечить учет времени нахождения отдельных блоков МРЛ во включенном состоянии; автоматическую обработку значений отраженных от метеопелей сигналов (ρ , χ) по месту и времени.

Технические средства, предназначенные для обнаружения гроз (грозопеленгаторы, грозопеленгаторы-дальномеры), должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать пеленгацию грозовых очагов в радиусе до 300 км и в зоне от 0 до 360°, а грозопеленгаторы-дальномеры - обеспечивать определение местоположения грозовых очагов в зоне от 0 до 360° и в радиусе до 300 км;

- вероятность пеленгации гроз, находящихся в радиусе до 300 км, должна быть не менее 0,9; предел допускаемой погрешности определения азимута гроз должен быть не более 9°, дальности в радиусе от 10 до 100 км - 10 км, а определения местоположения гроз в дискретной градации в зоне от 100 до 300 км должно быть с вероятностью 0,9;

- выходные измерительные сигналы грозопеленгатора и грозопеленгатора-дальномера должны отображаться на автономном индикаторном устройстве и передаваться в цифровом коде на вычислительное устройство автоматизированной метеорологической измерительной системы (АМИС). Данные о числе грозовых разрядов должны формироваться для той же пространственной дисперсности, что и данные об азимуте и удалении грозовых очагов.

Обледенением называется отложение льда на обтекаемых частях воздушных судов, силовых установках и внешних деталях специального оборудования. Опасность обледенения при взлете, наборе высоты, посадке зависит от его интенсивности. Несмотря на то что на воздушных судах применяются различные средства борьбы с обледенением, умеренное и сильное обледенение при посадке и взлете представляет большую опасность, так как отлагающийся при обледенении лед не только увеличивает массу воздушного судна, но и ухудшает его аэродинамические качества, что приводит к потере скорости и затрудняет управление.

Гололед - это матовый или прозрачный лед, нарастающий на аэродромных постройках, подъездных дорогах, взлетно-посадочной

полосе, на воздушных судах, линиях связи и электропередачи. Гололед осложняет посадку воздушных судов, так как торможение колес становится малоэффективным, а при посадке с боковым ветром возникает опасное отклонение от нужного направления пробега, что может привести к выкатыванию воздушного судна за пределы ВПП.

В настоящее время нет технических средств, непосредственно определяющих наличие и интенсивность обледенения воздушных судов и гололеда. Предупреждения о возможности обледенения воздушных судов даются на основании косвенных данных (наличие облаков и осадков, распределение температур с высотой).

Закрытие облаками вершин гор, сопков, перевалов, высоких искусственных препятствий (труб, мачт и т.д.) определяется визуально.

7. Требования к автоматизированным метеорологическим измерительным системам

При метеорологическом обеспечении посадки и взлета воздушных судов по минимумам II и III категорий необходимо обеспечить обновление информации о дальности видимости на ВПП, высоте нижней границы облаков (вертикальной видимости), параметрах ветра через I мин, давлении на ВПП, температуре и влажности через 15 мин, об опасных для авиации метеорологических явлениях по возникновении и автоматической передачей информации на средства отображения (табло, дисплей и др.) и обязательной регистрацией передаваемой метеоинформации на средствах регистрации.

Следовательно, для метеорологического обеспечения взлета и посадки воздушных судов по минимумам II и III категорий необходимы автоматизированные метеорологические измерительные системы, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- автоматизированные метеорологические измерительные системы (АМИС) должны обеспечивать автоматическое измерение, обработку, выдачу на средства отображения и в каналы связи, регистрацию метеоинформации, необходимой для метеорологического обеспечения взлета и посадки воздушных судов по минимумам II и III категорий;

- АМИС должна обеспечивать измерение, выдачу и регистрацию метеосъемов (дальность видимости на ВПП и метеорологическую дальность видимости, высоту нижней границы облаков или вертикальную видимость, параметры ветра, давление на ВПП и атмосферное давление, приведенное к уровню моря, температуру и влажность воздуха, сведения об опасных для авиации метеорологических явлениях)

в диапазонах и с пределами допускаемых погрешностей, указанных выше (ом. пп. I-6);

- минимальный период обновления информации о дальности видимости на ВПП и метеорологической дальности видимости, высоте нижней границы облаков (вертикальной видимости) и параметрах ветра должен быть не более 1 мин; о давлении на ВПП, атмосферном давлении, приведенном к уровню моря, температуре и влажности воздуха - не более 15 мин. Должна быть предусмотрена возможность перехода на обновление метеоинформации через 2, 5, 15, 30 и 60 мин (дальность видимости на ВПП и МДВ, ВНГО (ВВ), параметры ветра) и через 30, 60 мин и через 3 ч (давление на ВПП и атмосферное давление, приведенное к уровню моря, температура и влажность воздуха). Информация об опасных для авиации метеорологических явлениях должна передаваться немедленно при возникновении во всех режимах обновления информации;

- при обновлении метеоинформации через 5, 15, 30 и 60 мин должна быть предусмотрена возможность обновления метеоинформации по запросу с контрольного индикатора и с выносных индикаторов через контрольный индикатор. Время получения метеоинформации после запроса не должно превышать 1 мин;

- в АМИС должна быть обеспечена возможность ручного ввода метеоинформации о метеоэлементах, неизмеряемых автоматически (количество и форма облаков, атмосферные явления, погода в срок наблюдения и между сроками наблюдений и др.). Должна быть предусмотрена возможность контроля и исправления метеоинформации, передаваемой на выносные индикаторы. На выносные индикаторы должна передаваться метеоинформация только после контроля на контрольном индикаторе;

- к АМИС должно подключаться не менее 7 индикаторов, из них 1 контрольный;

- вся метеоинформация, выдаваемая на выносные индикаторы и в линию связи, должна регистрироваться на средствах регистрации. Должна быть обеспечена однозначность метеоинформации, отображаемой на контрольном и выносных индикаторах. Время хранения зарегистрированной метеоинформации должно быть не менее 10 сут;

- дистанционность передачи метеоинформации на выносные индикаторы (от контрольного) по двум проводам аэродромной линии связи должна обеспечиваться на длину не менее 10 км;

- на средствах отображения должна быть обеспечена буквенно-цифровая индикация следующей информации:

- дальность видимости на ВПП (три значения), округленная в

сторону наименьшего значения, как указано в п.1;

- метеорологическая дальность видимости (минимальная из трех) в десятках метров;
- высота нижней границы облаков (вертикальная видимость) в десятках метров (осредненная или минимальная);
- направление ветра, осредненное за 1 мин, в градусах, кратных 10^0 ;
- средняя скорость ветра, осредненная за 2 мин, в м/с;
- максимальная скорость ветра за 10 мин, в м/с;
- перпендикулярная составляющая к ВПП скорость максимального ветра в м/с;
- давление на аэродроме в мм рт.ст. и в гектопаскалях, округленное до целых единиц в сторону наименьшего значения;
- наличие на аэродроме и в районе аэродрома опасных для авиации метеорологических явлений ("шторм");
- температура воздуха в ^0C и относительная влажность в процентах или точка росы в ^0C ;
- время наблюдения (окончания измерений);
- АМИС должна обеспечивать дистанционный прием сигналов от первичных измерительных преобразователей метеовеличин по аэродромным линиям связи длиной, указанной в п.8 (общие требования). Должна быть обеспечена сигнализация об отказе первичного измерительного преобразователя или блока с указанием отказавшего.

Желательно, чтобы автоматизированные метеорологические измерительные системы обеспечивали:

- прием буквенно-цифровой информации от метеорологических радиолокаторов, грозопеленгаторов, станций и постов гидрометсети (штормового кольца), экипажей воздушных судов, обработку этой информации и автоматическую выдачу информации об опасных для авиации метеорологических явлениях;
- выдачу информации о наклонной дальности видимости, сдвигах ветра, турбулентности на линии глиссады и по траектории взлета воздушного судна;
- информацию о температуре воздуха над ВПП (на высоте 5 м);
- прогноз на 3-5 мин дальности видимости на ВПП, метеорологической дальности видимости, высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), параметров ветра и опасных для авиации метеорологических явлений.

8. Общие требования к метеооборудованию аэродромов

8.1. По общим конструктивно-техническим требованиям метеооборудование должно:

- удовлетворять действующим требованиям по стандартизации и унификации. Средства измерения дальности видимости, высоты нижней границы облаков (вертикальной видимости), параметров ветра, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха и др. должны обеспечивать возможность использования их как автономно, так и в качестве первичных измерительных преобразователей метеозадающих элементов в АМИС;

- быть электромагнитно совместимыми с аэродромными радиосветотехническими средствами при условии размещения метеооборудования по действующим требованиям (нормам);

- иметь массу блоков не более 30 кг;

- быть контролепригодными, иметь встроенные средства контроля работоспособности и учета времени наработки, а средства измерения и измерительные системы - метрологическое обеспечение;

- комплектоваться элементами, соответствующими современному уровню развития радиоэлектроники;

- иметь прочные лакокрасочные покрытия изделий;

- удовлетворять требованиям к электрической прочности изоляции и качеству электромонтажа (должна обеспечиваться работа изделий в условиях воздействия внешних факторов, соответствующих экстремальным условиям эксплуатации);

- быть работоспособными при питании от сети переменного тока напряжением 220 В с колебаниями в сторону увеличения до 10 %, в сторону уменьшения до 15 %, частотой (50 ± 1) Гц /24/;

- удовлетворять эргономическим требованиям и требованиям технической эстетики (обеспечение удобного выполнения функциональных обязанностей оператором, достаточность физических, в том числе зрительных и слуховых связей между оператором и аппаратурой, соответствие формы назначению, достижение целевой формы при помощи композиционных средств и т.д.);

- удовлетворять требованиям техники безопасности (к изделиям, устанавливаемым на метеоплощадке и на открытом воздухе, должно подаваться электропитание переменного тока напряжением до 36 В /25/, постоянного тока до 110 В /26/; должно быть обеспечено заземление частей изделий, которые могут оказаться под напряжением выше указанного и т.д.) /27/;

- удовлетворять гигиеническим требованиям санитарных норм и правил (электромагнитная обстановка, вредные воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал).

8.2. По устойчивости к климатическим воздействиям метеорооборудование должно удовлетворять следующим требованиям:

- изделия, устанавливаемые на открытом воздухе и в неотапливаемых помещениях (будках), должны быть работоспособными при температуре окружающей среды от -60 до $+50$ °C, относительной влажности (95 ± 3) % при температуре $+40$ °C, после циклического изменения температуры воздуха и должны быть пыле- и влагозащищенными;

- изделия, устанавливаемые в отапливаемых помещениях, должны быть работоспособными при температуре окружающей среды от $+5$ до $+50$ °C, относительной влажности до 98 % при температуре $+30$ °C;

- метеорооборудование должно быть устойчиво к воздействию инея и росы, холодоустойчивым (быть работоспособным после воздействия окружающей среды, имеющей температуру -70 °C, а также инея и росы), теплоустойчивым (быть работоспособным после воздействия окружающей среды, имеющей температуру $+60$ °C).

8.3. По механическим воздействиям метеорооборудование аэродромов должно быть работоспособным после транспортирования всеми видами транспорта (железнодорожный, автомобильный, воздушный и водный), быть вибропрочным, должен отсутствовать резонанс конструктивных элементов при вибрации в диапазоне частот от 5 до 25 Гц.

8.4. По надежности метеорологическое оборудование аэродрома должно быть восстанавливаемым, ремонтпригодным и при условии периодического технического обслуживания удовлетворять следующим требованиям:

- по безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости ГОСТ 13216-74 /28/ (вероятность безотказной работы за 1000 ч не менее 0,8 или средняя наработка на отказ не менее 4500 ч);

- удельная суммарная продолжительность (трудоемкость) технического обслуживания должна быть не более 0,01 (один рабочий день в месяц при условии круглосуточной непрерывной работы, т.е. 8 : 720);

- время непрерывной работы без технического обслуживания не менее 200 ч;

- время приведения в работоспособное состояние резервного изделия не более 2 мин;

- средний срок службы не менее 8 лет.

8.5. Эксплуатационная документация на метеорооборудование аэродромов должна соответствовать требованиям ГОСТ 2.601-68

/29/. В эксплуатационную документацию должны входить: техническое описание, инструкция по эксплуатации, формуляр. Эксплуатационные документы должны быть рассчитаны на технический уровень обслуживающего персонала. В эксплуатационную документацию по /30/ должен входить регламент технического обслуживания.

8.6. Конструкция метеоборудования должна обеспечивать дистанционные измерения метеозадающих элементов на аэродроме. Дистанционность передачи выходных сигналов от первичных измерительных преобразователей до индикаторов (регистраторов) по аэродромным линиям связи, отвечающим требованиям ПТЭ РТОС ГА-74 /31/, должна быть обеспечена на длину не менее: 8 км при измерении дальности видимости, высоты нижней границы облаков и параметров ветра; 50 м при измерении атмосферного давления; 200 м при измерении температуры и влажности воздуха.

Список литературы

1. Наставление по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА-78). - М.: Воздушный транспорт, 1978.
2. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации СССР (НМО ГА-82). - Л.: Гидрометеоздат, 1982.
3. Нормы годности к эксплуатации в СССР оборудования гражданских аэродромов и воздушных трасс (НГЭО-81). - М.: Воздушный транспорт, 1983.
4. Гаврилов В.А., Горьшин В.И. Об определении посадочной видимости на аэродромах // Труды ИТО. - 1964. - Вып.153. - С.18-23.
5. Бурлов Г.М. Уравнения дальности видимости для оптически неоднородной атмосферы // Труды НИИ ГМП. - 1973. - Вып.28. - С.83-91.
6. Афанасьев А.А. К вопросу об определении посадочной дальности видимости // Труды ИТО. - 1982. - Вып.461. - С.94-102.
7. Круглов Р.А. Оценка условий видимости на наклонном отрезке глиссады снижения по градиентным измерениям прозрачности // Труды ИТО. - 1982. - Вып.461. - С.108-110.
8. Ковалев В.А. Определение условий видимости на конечном участке глиссады снижения // Метеорология и гидрология. - 1984. - № 4. - С.40-47.
9. Боханов В.Е. К вопросу о метеорологических посадочных минимумах // Труды ИТО. - 1980. - Вып.413. - С.133-142.

- Ю. Белогородский С.Л. К вопросу определения видимости в атмосфере применительно к взлету и посадке воздушных судов // Метеорология и гидрология. - 1979. - № 5. - С.57-61.
- II. Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней / ИКАО. 1981.
- И2. Баранов А.М., Солонин С.В. Авиационная метеорология. - Л.: Гидрометеиздат, 1981.
- И3. Рубинштейн М.В. О колебаниях высоты нижней границы облаков // Метеорология и гидрология. - 1963. - № 5.
- И4. Рубинштейн М.В. О сравнимости высот нижней границы облаков, определенных с помощью приборов и самолета // Труды ЦИП. - 1966. - Вып.157.
- И5. Юдин М.А. Вопросы теории турбулентности и структуры ветра с приложением к задаче колебания самолета // Труды НИУ ГИМС. - 1946. - Сер. I, вып.35.
- И6. Андреев И.Д. Выбор оптимального интервала осреднения скорости ветра // Труды ИТО. - 1958. - Вып.83.
- И7. Луцкий В., Галашин Е. Вибрация самолета в полете // Авиация и космонавтика. - 1969. - № 7.
- И8. Глазун В.Т. Сдвиги ветра, влияющие на взлет и посадку воздушных судов. - М.: Гидрометеиздат, 1982.
- И9. Оперативные требования, предъявляемые международной авиацией к метеорологической информации, необходимой при заходе на посадку, посадке и взлете самолетов (приняты совместно на IV сессии Комиссии авиационной метеорологии ВМО и У аэронавигационной конференции ИКАО. Монреаль, ноябрь-декабрь 1967). Основные рекомендации КАМ-IV и АНК-5. - М.: Гидрометеиздат, 1968.
- И10. Бесчастнов С.П., Бызова Н.Л., Волков и др. Новые данные о сдвигах ветра и турбулентности по измерениям на высотной мачте ИЭМ // Тез. докл. на Всесоюз. конф. по авиационной метеорологии и прикладной авиационной климатологии, октябрь 1982 г. - М.: ВНИИГМИ-МЦД, 1982.
- И11. Авиационно-климатический атлас-справочник СССР. Вып. I. Климатические характеристики основных аэропортов. Ч. I. - М.: Гидрометеиздат, 1973.
- И12. ГОСТ 8,221-76. Влагометрия и гигрометрия. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1977.
- И13. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов. - Л.: Гидрометеиздат, 1975.

24. Правила устройства электроустановок (ПЭУ-76). - 5-е изд. - М.: Энергоиздат, 1982.

25. Правила по технике безопасности при производстве наблюдений и работ на сети Госкомгидромета. - Л.: Гидрометеиздат, 1983.

26. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. - М.: Изд-во стандартов, 1979.

27. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭ и ПТБ). - М.: Атомиздат, 1973.

28. ГОСТ 13216-74. Приборы и средства автоматизации ГСП. Надежность. Общие технические требования и методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1975.

29. ГОСТ 2.601-68. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. - М.: Изд-во стандартов, 1969.

30. Правила сертификации оборудования аэропортов, гражданских аэродромов и воздушных трасс СССР (временные). - М.: Воздушный транспорт, 1976.

31. Правила технической эксплуатации наземных средств радиотехнического обеспечения полетов и электросвязи гражданской авиации (ПТЭ РТОС ГА-77). - М.: Воздушный транспорт, 1978.

32. Персин С.М., Анискин Л.В. Об измерении характеристик ветра // См. наст. сб.

А.С.Солонин

ОБ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ СИСТЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИИ

При разработке структуры и построении моделей системы метеорологического обеспечения обычно используют методы системного анализа, позволяющие выявить на уровне принципиальных схем ее общую структуру. С одной стороны, принципиальная схема системы является ее простейшей моделью, а с другой — отсутствует строгость описания, которая особенно важна для процесса математического анализа и синтеза всей системы в целом, а также при разработке программного обеспечения вычислительного комплекса системы, реализующего процедуры обработки метеорологической информации в реальном масштабе времени.

Использование теоретико-множественного подхода к анализу и синтезу системы метеорологического обеспечения авиации позволяет внести в ее описание математическую строгость и в то же время сохранить простоту принципиальных схем /1-3/. В связи с этим в настоящей работе рассматривается задача теоретико-множественного анализа и синтеза системы метеорологического обеспечения авиации, решение которой представляет собой математическое описание высокого уровня в терминах, характерных для задачи. При этом необходимо отметить, что движение воздушных судов (ВС) в атмосфере сопровождается сложным взаимодействием с окружающей их физической средой (атмосферой). Поэтому при анализе и синтезе автоматизированной системы управления воздушным движением (АС УВД) необходимо рассматривать ВС и атмосферу (АТ) как единую систему ("АТ-ВС").

С использованием теоретико-множественного подхода система "АТ-ВС" допускает описание в виде адекватной математической модели.

Обозначим состояние атмосферы в одной точке $i \in N$ в момент времени $t \in T$ через ω_{it} , а множество всевозможных состояний атмосферы в этой точке через Ω_i :

$$\omega_{it} \in \Omega_i.$$

Тогда множество всех состояний атмосферы Ω представляется декартовым произведением множеств Ω_i :

$$\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_l,$$

где $l = \text{card } N$.

Пусть наблюдения за погодой производятся в точках $i \in N$ трассы $k \in K$. Тогда состояния атмосферы на трассах (включая район аэропортов) полетов ВС определяются отображением

$$\omega: N \times K \times T \longrightarrow \Omega$$

Собственное подмножество S_{AT} декартова произведения множеств $\Omega \times T \times N \times K$:

$$S_{AT} \subseteq \Omega \times T \times N \times K,$$

является адекватной системой реальной атмосферы на трассах полетов ВС. Для того чтобы судить о физическом состоянии атмосферы, производятся наблюдения и измерения какого-то определенного комплекса метеорологических параметров. Обозначим его через $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x \in X \subseteq R^n$,

$$x: T \times N \times K \times \Omega \longrightarrow X.$$

Таким образом, в реальных условиях имеется только модель атмосферы, т.е.

$$S_{M(AT)} \subseteq T \times N \times K \times X.$$

Процесс построения модели атмосферы задается следующей диаграммой:

$$\begin{array}{ccc} S_{AT} & \subseteq & \Omega \times T \times N \times K \\ \downarrow & & \downarrow \\ S_{M(AT)} & \subseteq & X \times T \times N \times K \end{array}$$

Диаграмма показывает, что процесс построения модели атмосферы сводится к определению комплекса метеорологических параметров атмосферы и построению отношения на множество этих параметров, которое задается, например, системой уравнений динамики атмосферы с учетом турбулентного обмена, или определяется конечным набором физико-статистических операторов.

Пусть F множество ВС $\mathcal{F}$, выполняющих полеты по трассам $k \in K$. Тогда собственное подмножество S_{BC} декартова произведения множеств $F \times N \times K \times T$:

$$S_{BC} \subseteq F \times T \times K \times N,$$

задает систему, которая описывается движением ВС $f \in F$ по трассам $k \in K$.

Для моделирования движения ВС в системе "АТ-ВС" воспользуемся евклидовым пространством R^m размерности m . Каждое ВС $f \in F$ будет описываться вектором y с компонентами $y_1, y_2, \dots, y_m$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$. Размерность этого пространства зависит от характера решаемых задач. При метеорологическом обеспечении полетов ВС минимальная размерность пространства равна $m_{\min} = 5$ (длгота, широта, высота полета, курс полета и скорость). Отображение

$$y: F \times N \times K \times T \longrightarrow y \in R^m$$

ставит в соответствие каждому ВС $f \in F$ набор характеристик $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, которые определяют положение ВС в процессе их движения по трассам $k \in K$. Модель системы движения ВС $f \in F$ по трассам $k \in K$ задается собственным подмножеством $S_{m(BC)}$ декартова произведения множеств $Y \times N \times K \times T$:

$$S_{m(BC)} \subseteq Y \times N \times K \times T.$$

Построение модели движения ВС описывается следующей диаграммой:

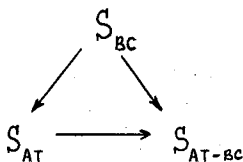
$$\begin{array}{ccc} S_{BC} & \subseteq & F \times N \times K \times T, \\ \downarrow & & \downarrow \\ S_{m(BC)} & \subseteq & Y \times N \times K \times T. \end{array}$$

Следовательно, построение модели системы движения ВС определяется заданием набора характеристик, описывающих положение ВС в процессе их движения по трассам, и отношения, которое описывает процесс движения. Такое отношение задается, например, с помощью системы кинематических уравнений траекторий полетов ВС.

Синтезируемая система "АТ-ВС", описывающая движение ВС в атмосфере, представляется собственным подмножеством S_{AT-BC} декартова произведения множеств $\Omega \times F \times N \times K \times T$:

$$S_{AT-BC} \subseteq \Omega \times F \times N \times K \times T.$$

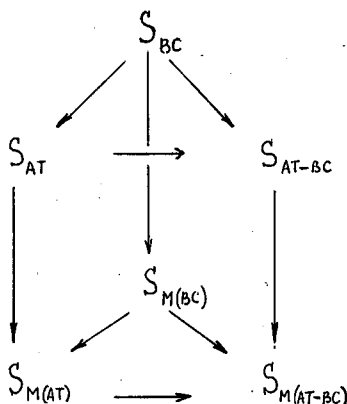
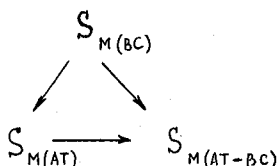
Синтез системы "АТ-ВС" задается следующей диаграммой:



В реальных условиях имеются лишь модели $S_{M(AT)}$ и $S_{M(BC)}$ рассматриваемых систем S_{AT} и S_{BC} . Таким образом, синтезируемая модель системы "АТ-ВС" описывается собственным подмножеством $S_{M(AT-BC)}$ декартова произведения множеств $Y \times X \times T \times N \times K$:

$$S_{M(AT-BC)} \subseteq Y \times X \times T \times N \times K.$$

Построение модели синтезируемой системы "АТ-ВС" определяется диаграммой



Следующая обобщенная диаграмма отображений подводит итог всем, приведенным выше, концептуальным построениям систем S_{AT-BC} и $S_{M(AT-BC)}$. Синтезируемая модель системы "АТ-ВС" с определенной степенью адекватности отражает процесс движения ВС в атмосфере. Степень соответствия модели системы $S_{M(AT-BC)}$ с реальной системой S_{AT-BC} должна возрастать с течением времени. Алгоритмы, обеспечивающие адаптацию параметров модели $S_{M(AT-BC)}$, в режиме функционирования должны на основе обработки доступной текущей метеорологической и навигационной информации изменять параметры либо структуру модели с тем, чтобы с течением времени она более адекватно описывала движения ВС $f \in F$ по трассам $k \in K$ с учетом метеорологических условий на них.

Регулирует и контролирует процесс движения ВС $f \in F$, функционирующих в S_{AT-BC} , система УВД, структура которой может быть абстрактно представлена в виде двухуровневной системы S :

$$S = \langle u_0; u_1, \dots, u_n; S_{AT-BC} \rangle;$$

где u_0 - система управления верхнего уровня (координата); u_i , $1 \leq i \leq n$ - системы оперативного управления, нижнего уровня; S_{AT-BC} -

описанная выше управляемая система АТ-ВС, для которой управление строится в настоящее время только для $S_{ВС}$ с учетом фактического и прогностического состояния $S_{АТ}$; $\prec$ - предикат, устанавливающий место каждой управляющей системы в иерархии. При синтезе более сложных систем УВД с многими иерархическими уровнями двух-уровневые системы управления S могут использоваться в качестве основных модулей.

Система управления верхнего уровня U_0 решает задачи по координации работы систем оперативного уровня управления U_i посредством упорядочения потоков ВС с помощью организационных решений, установления правил по производству полетов, построения сети воздушных трасс, задания характеристик входящих потоков через расписание, обеспечения полетов ВС навигационной и метеорологической информацией. Системы оперативного управления нижнего уровня U_i решают задачи поддержания безопасного пространственного разделения ВС и обеспечения безопасности воздушного движения по метеорологическим причинам в контролируемой зоне.

Пусть

$$U_{01} = U_{01}^{(1)} \times \dots \times U_{01}^{(n)}$$

- множество управляющих воздействий, поступающих к системам оперативного управления U_i от вышестоящей управляющей системы U_0 ;

$$\tilde{U}_{10} = \tilde{U}_{10}^{(1)} \times \dots \times \tilde{U}_{10}^{(n)}$$

- множество информационных воздействий, поступающих к вышестоящей управляющей системе U_0 по каналам обратной связи от систем U_i оперативного уровня управления;

$$U_{12} = U_{12}^{(1)} \times \dots \times U_{12}^{(n)}$$

- множество управляющих воздействий, поступающих к управляемой системе $S_{АТ-ВС}$ от систем U_i оперативного уровня управления;

$$\tilde{U}_{21} = \tilde{U}_{21}^{(1)} \times \dots \times \tilde{U}_{21}^{(n)}$$

- множество информационных воздействий, поступающих к системам оперативного уровня управления по каналам обратной связи от управляемой системы $S_{АТ-ВС}$.

Тогда функционирование системы управления воздушным движением S задается с помощью трех отображений:

$$u_0: \tilde{U}_{10} \longrightarrow U_{01},$$

$$u_i: U_{01}^{(i)} \times \tilde{U}_{21}^{(i)} \longrightarrow U_{12}^{(i)} \times \tilde{U}_{10}^{(i)}, \quad 1 \leq i \leq n,$$

$$u_s: S_{AT-BC} \times U_{12} \longrightarrow S_{AT-BC} \times \tilde{U}_{21}.$$

Отображение u_0 описывает работу вышестоящей управляющей системы, которая строит по информационным воздействиям $\tilde{u}_{10} = (\tilde{u}_{10}^{(1)}, \dots, \tilde{u}_{10}^{(n)}) \in \tilde{U}_{10}$ управляющие воздействия $u_{01} = (u_{01}^{(1)}, \dots, u_{01}^{(n)}) \in U_{01}$, поступающие к системам оперативного уровня управления u_i . Отображения u_i задают работу систем оперативного уровня управления, которые по управляющим воздействиям $u_{01} = (u_{01}^{(1)}, \dots, u_{01}^{(n)}) \in U_{01}$ и информационным воздействиям $\tilde{u}_{21} = (\tilde{u}_{21}^{(1)}, \dots, \tilde{u}_{21}^{(n)}) \in \tilde{U}_{21}$ определяют управляющие воздействия $u_{12} = (u_{12}^{(1)}, \dots, u_{12}^{(n)}) \in U_{12}$ и информационные воздействия $\tilde{u}_{10} = (\tilde{u}_{10}^{(1)}, \dots, \tilde{u}_{10}^{(n)}) \in \tilde{U}_{10}$, поступающие к S_{AT-BC} и u_0 соответственно. Отображение u_s преобразует состояния системы "АТ-ВС" $s = (\omega, f, n, k, t) \in S_{AT-BC}$ под действием управляющих воздействий $u_{12} = (u_{12}^{(1)}, \dots, u_{12}^{(n)}) \in U_{12}$ в новое состояние $\hat{s} = (\hat{\omega}, \hat{f}, \hat{n}, \hat{k}, \hat{t}) \in S_{AT-BC}$ и передает информационные воздействия $\tilde{u}_{21} = (\tilde{u}_{21}^{(1)}, \dots, \tilde{u}_{21}^{(n)}) \in \tilde{U}_{21}$ системам $u_i, 1 \leq i \leq n$, оперативного уровня управления об этом, т.е. u_s описывает процесс управления системой S_{AT-BC} .

Движение $f \in F$ с учетом метеорологических условий в зонах (секторах) управления описывается подсистемами $S_{AT-BC}^{(i)}, 1 \leq i \leq n$ системы S_{AT-BC} такими, что

$$S_{AT-BC}^{(i)} = F^{(i)} \times \Omega^{(i)} \times N^{(i)} \times K^{(i)} \times T^{(i)},$$

где $F^{(i)} \subseteq F, \Omega^{(i)} \subseteq \Omega, N^{(i)} \subseteq N, K^{(i)} \subseteq K, T^{(i)} \subseteq T$ - процесс управления движением ВС $f \in F^{(i)}$ из $S_{AT-BC}^{(i)}$ характеризуется отображениями $u_s^{(i)}, 1 \leq i \leq n$:

$$u_s^{(i)}: S_{AT-BC}^{(i)} \times U_{12}^{(i)} \times U_c^{(i)} \longrightarrow S_{AT-BC}^{(i)} \times \tilde{U}_{21}^{(i)},$$

где $U_c^{(i)}$ - множество информационных связующих воздействий $u_c^{(i)} = (u_{c1}^{(i)}, \dots, u_{cn}^{(i)})$, осуществляющих связь между подпроцессами $u_s^{(k)}$ и $u_s^{(i)}$ ($k \neq i$). Следовательно,

$$S_{AT-BC} = S_{AT-BC}^{(1)} \times \dots \times S_{AT-BC}^{(n)},$$

$$u_s = (u_s^{(1)}, \dots, u_s^{(n)}).$$

Проведенный теоретико-множественный анализ и синтез системы метеорологического обеспечения иерархических систем управления воздушным движением позволяет дать общее описание всей системы в целом. При этом необходимо отметить, что решение задач автоматизированного управления воздушным движением S_{BC} невозможно без построения модели атмосферы S_{AT} и учета ее особенностей. Структура модели S_{AT} должна иметь иерархический характер с вложенной организацией системы моделей (как гидродинамических, так и физико-статистических), описывающих пространственно-временные особенности атмосферы разного масштаба. Полученное описание системы S_{AT-BC} может служить основой дальнейшей детализации и разработки программного обеспечения для вычислительного комплекса, реализующего алгоритмы обработки и представления метеорологической информации в автоматизированных системах управления воздушным движением реального масштаба времени.

Список литературы

1. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. - М.: Мир, 1972. - 398 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такаха Я. Теория иерархических многоуровневых систем. - М.: Мир, 1973. - 344 с.
3. Требования и спецификации в разработке программ. Сб. статей. - М.: Мир, 1984. - 344 с.

О КООРДИНИРУЮЩИХ СТРАТЕГИЯХ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Система управления воздушным движением регулирует и контролирует процесс движения воздушных судов (ВС). Ее структура, как показано в работе /3/, абстрактно представляется в виде двухуровневой иерархической системы

$$S = \langle u_0; u_1, \dots, u_n; \prec; S_{M(AT-BC)} \rangle, \quad (I)$$

где u_0 - система управления верхнего уровня (координатор); u_i , $1 \leq i \leq n$ - системы оперативного уровня управления; $\prec$ - предикат, устанавливающий место каждой управляющей системы в иерархии S ; $S_{M(AT-BC)}$ - управляемая модель системы атмосфера - воздушные суда, для которой управление строится в настоящее время только для $S_{M(BC)}$ с учетом фактического и прогностического состояния $S_{M(AT)}$.

Взаимодействие подпроцессов управления $u_s^{(i)}$, стремящихся достигнуть своих индивидуальных целей, и отсутствие оперативных координирующих воздействий $u_{o1} \in U_{o1}$ верхнего уровня управления u_0 , который в реальных условиях формирует управляющие воздействия не на основе текущей информации о состоянии системы S в целом, а только на основе весьма общих ее свойств, известных априори (используется только информация о состоянии подсистем $S_{AT-BC}^{(i)}$ системы $S_{AT-BC}^{(i)}$), приводит к возникновению конфликтов между подсистемами $S_{AT-BC}^{(i)}$ /3/.

В связи с этим возникает необходимость рассмотрения принципов координирования взаимодействий подпроцессов $u_s^{(i)}$ управления движением ВС в $S_{BC}^{(i)}$, которые позволяют устранить эти конфликты. При этом безопасность и регулярность полетов обеспечивается оптимальным учетом состояний s системы S_{AT} .

Преодоление внутриорганизационного конфликта между процессами u_i управления движением ВС $f \in F$ в системах $S_{AT-BC}^{(i)}$ осуществляется вышестоящей управляющей системой u_0 , которая стремится согласовать их взаимодействие.

Пусть P_{u_0} - задача вышестоящей управляющей системы u_0 по обеспечению безопасности, регулярности и высокой экономической эффективности воздушного движения в системе S_{AT-BC} . Координирующие воздействия $u_{o1} = (u_{o1}^{(1)}, \dots, u_{o1}^{(n)}) \in U_{o1}$ вышестоящей управля-

ищей системы u_0 конкретизируют задачи $P_{u_i}(u_{o1})$, стоящие перед нижестоящими системами u_i оперативного уровня УВД по обеспечению безопасности, регулярности и эффективности воздушного движения в зонах (секторах) управления системами $S_{AT-BC}^{(i)}$. Обозначим через

$$P_u = \{P_{u_1}, \dots, P_{u_n}\}$$

множество независимых задач P_{u_i} , решаемых системами $u_i, 1 \leq i \leq n$ оперативного уровня управления. Решениями задач P_{u_0} и P_u являются координирующие воздействия $u_{o1} \in U_{o1}$ и оперативные управляющие воздействия $u_{i2} \in U_{i2}$ соответственно. Рассмотрим предикат $CHECK(u, P)$, который проверяет то, что u есть решение задачи P УВД на некотором уровне иерархии системы S . Тогда вышестоящая управляющая система u_0 координирует взаимодействия между процессами u_i оперативного уровня управления системами $S_{AT-BC}^{(i)}$, если существует такое координирующее воздействие $u_{o1} \in U_{o1}$, параметризующее задачи $P_{u_i}(u_{o1})$, и оперативное воздействие $u_{i2} \in U_{i2}$ на систему S_{AT-BC} , что $u_{i2} = (u_{i2}^{(1)}, \dots, u_{i2}^{(n)})$ решает задачу P_{u_i} оперативного УВД, а $u_{o1} = (u_{o1}^{(1)}, \dots, u_{o1}^{(n)})$ - задачу P_{u_0} , т.е. истинно логическое выражение:

$$(\exists u_{o1} \in U_{o1})(\exists u_{i2} \in U_{i2})[CHECK(u_{i2}, P_{u_i}) \& CHECK(u_{o1}, P_{u_0})], \quad (2)$$

Успех координирующих воздействий $u_{o1} \in U_{o1}$, решающих задачу P_{u_0} , определяется воздействиями $u_{i2} \in U_{i2}$ оперативного уровня УВД. В связи с этим определим такой предикат $VERIFY(u_{o1}, u_{i2})$, контролирующий удовлетворительность решений u_{o1} и u_{i2} для задач P_{u_0} и P_u , при котором справедливо следующее логическое выражение:

$$CHECK(u_{o1}, P_{u_0}) \iff (\exists u_{i2} \in U_{i2})[VERIFY(u_{o1}, u_{i2})]. \quad (3)$$

Необходимым условием согласования взаимодействий подпроцессов u_i оперативного уровня УВД системой S_{AT-BC} в целом является совместимость задач P_{u_i} , решаемых на этом уровне, с задачей P_{u_0} вышестоящего уровня управления. Такое условие совместимости представляется логической импликацией вида:

$$(\forall u_{o1} \in U_{o1})(\forall u_{i2} \in U_{i2})\{[CHECK(u_{i2}, P_{u_i}(u_{o1})) \&$$

$$\& \text{VERIFY}(u_{o1}, u_{i2})] \Rightarrow [\text{CHECK}(u_{i2}, P_u(u_{o1})) \& \\ \& \text{CHECK}(u_{i2}, P_{u_o})] \} . \quad (4)$$

Сформулируем стратегии выбора координирующих воздействий $u_{o1} \in U_{o1}$ системой U_o управления движением $f \in F$ в S_{AT-BC} , которые удовлетворяют условиям (3), (4).

Регулирование движением ВС в системе S_{AT-BC} основано на командно-распорядительных методах воздействия. Следовательно, адекватными этим методам будут стратегии предписания, сравнения и множества взаимодействий, применимость которых зависит от поставленных задач P_{u_o} и P_u перед системой УВД.

Стратегия предписания взаимодействий основана на том, что задача P_{u_o} вышестоящего уровня системы УВД имеет решение в образе управляющего воздействия $u_{i2} \in U_{i2}$ тогда и только тогда, когда управляющее воздействие u_{i2} есть решение задачи $P_u(u_{o1})$, поставленной перед нижестоящими управляющими системами u_i для $S_{AT-BC}^{(1)}$, и предписанное связующее воздействие $u_c(u_{o1}) = u_c(u_{i2}(u_{o1}))$ является правильным при использовании управляющего воздействия $u_{i2}(u_{o1})$. Эта стратегия задается следующей логической формулой:

$$(\forall u_{o1} \in U_{o1})(\forall u_{i2} \in U_{i2}) \{ [\text{CHECK}(u_{i2}, P_u(u_{o1})) \& \\ \& u_c(u_{i2}) = u_c(u_{o1})] \Rightarrow \text{CHECK}(u_{i2}, P_{u_o}) \} . \quad (5)$$

Основным в стратегии (4) является предписание системам u_i таких связующих взаимодействий $u_c(u_{o1}) = u_c(u_{i2}(u_{o1}))$, которые обеспечивают истинность предикату $\text{VERIFY}(u_{o1}, u_{i2})$.

Анализ различий между фактическими взаимодействиями $u_c(u_{i2})$ с требуемыми подсистемами u_i оперативного уровня УВД и взаимодействиями $\tilde{u}_c(u_{i2})$ позволяет сформулировать стратегию сравнения взаимодействий:

$$(\forall u_{o1} \in U_{o1})(\forall u_{i2} \in U_{i2}) \{ [\text{CHECK}(u_{i2}, P_u(u_{o1})) \& \\ \& u_c(u_{i2}) = \tilde{u}_c(u_{i2})] \Rightarrow \text{CHECK}(u_{i2}, P_{u_o}) \} . \quad (6)$$

Стратегия сравнения взаимодействий (6) используется для согласования взаимодействий подсистем u_i в системе S (управления системой S_{AT-BC}) в целом. Согласованность взаимодействий происхо-

дит путем уменьшения рассогласованности между фактическими взаимодействиями $u_c(u_{i2})$ с необходимыми взаимодействиями для подсистем u_i оперативного уровня УВД.

Возможен случай, когда вышестоящая управляющая система u_0 имеет возможность задавать целое множество взаимодействий $\tilde{U}_c \subset U_c$, из которого подсистемы u_i оперативного уровня УВД выбирают связующие взаимодействия $u_c(u_{i2}) \in \tilde{U}$. Этому случаю соответствует стратегия множества взаимодействий:

$$(\forall u_{01} \in U_{01})(\forall u_{i2} \in U_{i2}) \{ [\text{CHECK}(u_{i2}, P_{u_i}(u_{01})) \& \\ \& u_c(u_{i2}) \in \tilde{U}_c \Rightarrow \text{CHECK}(u_{i2}, P_{u_c})] \}. \quad (7)$$

Стратегия множества взаимодействий (7) обеспечивает некоторую свободу в выборе связующих взаимодействий $u_c(u_{i2})$, что объясняется возможным существованием целого множества вариантов решений глобальной задачи P_{u_0} .

Одной из основных задач, решаемых иерархической системой УВД S , является задача оптимального управления системой $S_{\text{AT-BC}}$. В связи с этим рассмотрим функционалы качества управления для различных уровней иерархии S .

Целью управления воздушным движением в системе $S_{\text{AT-BC}}$ является решение задач P_{u_0} и P_{u_i} , $1 \leq i \leq n$, стоящих перед вышестоящей управляющей системой u_0 и системами оперативного уровня управления u_i , оптимальным образом. При этом оптимальность понимается в смысле достижения экстремумов для функционалов, характеризующих экономичность, регулярность и безопасность полетов ВС $f \in F$. Достижение экстремумов для двух и более функционалов наталкивается на трудности, которые связаны с тем, что экстремумы у различных функционалов не совпадают. Поэтому далее будем ставить задачу об экстремуме одного функционала, характеризующего экономичность полетов ВС $f \in F$, налагая дополнительные условия на их безопасность и регулярность, которые определяются состоянием системы S_{AT} .

Общий вид функционала качества решения задачи P_{u_0} управления системой $S_{\text{AT-BC}}$ в целом задается функциональным отображением

$$W^{(0)}: S_{\text{AT-BC}} \times U_{01} \longrightarrow \text{COST} \subseteq \mathbb{R}, \quad (8)$$

где COST — множество штрафов, которое частично или полностью

упорядочено отношением $\leq$, индуцированным из $\mathbb{R}$.

Запишем функционал (8) в виде, представляющем практический интерес для оптимального управления системой S_{AT-BC} :

$$W^{(0)}(u_{01}) = \sum_{s \in S_{AT-BC}} w^{(0)}(s, u_{01}), \quad (9)$$

здесь $w^{(0)}$ есть, например, время или расход топлива при переходе системы в состояние $s \in S_{AT-BC}$ под действием управляющего воздействия $u_{01} \in U_{01}$. Задача оптимального управления системой S_{AT-BC} на вышестоящем уровне управления u_0 состоит в нахождении таких координирующих воздействий u_{01}^* , чтобы

$$W^{(0)}(u_{01}^*) = \min_{u_{01} \in U_{01}} W^{(0)}(u_{01}). \quad (10)$$

Для задач P_{u_i} , $1 \leq i \leq n$, оперативного уровня управления в секторах или зонах $S_{AT-BC}^{(i)}$ функционалы качества представляются отображениями

$$W^{(i)}: S_{AT-BC}^{(i)} \times U_{i2}^{(i)} \longrightarrow \text{cost} \in \mathbb{R} \quad (11)$$

и выражаются формулами

$$W^{(i)} = \sum_{s \in S_{AT-BC}^{(i)}} w^{(i)}(s, u_{i2}), \quad (12)$$

где $w^{(i)}$ обычно имеют смысл тот же, что и $w^{(0)}$ в (9). Задача состоит в том, чтобы построить такое оперативное управляющее воздействие u_{i2}^* , зависящее от координирующего воздействия u_{01}^* задачи (10), чтобы

$$W^{(i)}(u_{i2}^*) = \min_{u_{i2}(u_{01}^*) \in U_{i2}} W^{(i)}(u_{i2}). \quad (13)$$

Совместное решение оптимизационных задач (10), (13) при управлении системой S_{AT-BC} приводит к необходимости модификации рассмотренных выше стратегий согласования взаимодействий для

устранения возникающих противоречий между оптимальными управляющими воздействиями разных уровней иерархии системы S . Поиск оптимальных координирующих $u_{c1}^* \in U_{c1}$ и управляющих воздействий $u_{12} \in U_{12}$ с использованием стратегии предписывания взаимодействий (5) приводит к следующей ее модификации:

$$\begin{aligned} & (\forall u_{c1}^* \in U_{c1})(\forall u_{12}(u_{c1}^*) \in U_{12})(\exists u_{12}^* \in U_{12}) \{ [(u_{12} = \\ & = u_{12}(u_{c1}^*)) \& \text{CHECK}(u_{12}, P_u(u_{c1}^*)) \& (u_c(u_{12}^* = \\ & = u_c(u_{c1}^*))] \implies [\text{CHECK}(u_{12}, P_{u_c}) \& (u_{12} = u_{12}^*)] \}. \end{aligned} \quad (I4)$$

Стратегия сравнения взаимодействий (6) при решении задач (I0), (I3) записывается логической импликацией:

$$\begin{aligned} & (\forall u_{c1}^* \in U_{c1})(\forall u_{12}(u_{c1}^*) \in U_{12})(\exists u_{12}^* \in U_{12}) \{ [(u_{12} = u_{12}(u_{c1}^*)) \& \\ & \& \text{CHECK}(u_{12}, P_u(u_{c1}^*)) \& (u_c(u_{12}) = \tilde{u}_c(u_{12}(u_{c1}^*)))] \implies \\ & \implies [\text{CHECK}(u_{12}, P_{u_c}) \& (u_{12} = u_{12}^*)] \}. \end{aligned} \quad (I5)$$

Модификация стратегии множества взаимодействий (7) представляется логической формулой:

$$\begin{aligned} & (\forall u_{c1}^* \in U_{c1})(\forall u_{12}(u_{c1}^*) \in U_{12})(\exists u_{12}^* \in U_{12}) \{ [(u_{12} = \\ & = u_{12}(u_{c1}^*)) \& \text{CHECK}(u_{12}, P_u(u_{c1}^*)) \& (u_c(u_{12}) \in \tilde{U}_c(u_{c1}^*))] \implies \\ & \implies [\text{CHECK}(u_{12}, P_{u_c}) \& (u_{12} = u_{12}^*)] \}. \end{aligned} \quad (I6)$$

Таким образом, стратегии (I4)–(I6) позволяют построить оптимальное управление $u_{c1}^* \in U_{c1}$ всей системой S_{AT-BC} , т.е. обеспечить экстремум функционала (I0) и определить оптимальные оперативные управляющие воздействия $u_{12}^* \in U_{12}$, которые соответствуют экстремуму функционала (I3) при дополнительных ограничениях на безопасность и регулярность полетов. Эти ограничения определяются фактическим и прогностическим состояниями физического состояния

атмосферы, которые описываются с помощью модели S_{AT} . Алгоритмы построения оптимальных координирующих и оперативных управляющих воздействий основаны на модифицированных стратегиях предписания, сравнения и множества взаимодействий. Использование таких алгоритмов в вычислительных комплексах иерархических систем управления воздушным движением реального масштаба времени позволяет устранить возможные конфликты между ее подсистемами на основе оптимального учета метеорологических условий на воздушных трассах и в районах аэропортов.

Список литературы

1. М е с и р а в и ч М., М а к о Д., Т а к а х а р а И. Теория иерархических многоуровневых систем. - М.: Мир, 1973. - 344 с.

2. М и х а л е в и ч В.С., В о л к о в и ч В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. - М.: Наука, 1982. - 286 с.

3. С о л о н и н А.С. Об анализе и синтезе систем метеорологического обеспечения авиации // См. наст. сб.

С.М.Персин, Л.В.Анискин

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА НА АЭРОДРОМАХ

Изменчивость ветра в пространстве и во времени существенно влияет на условия взлета и посадки воздушных судов. Перечень характеристик ветра, рекомендованный для измерения на аэродромах различными документами, довольно обширен и включает в себя:

- среднюю скорость ветра за 2 и 10 мин;
- максимальные порывы мгновенной скорости ветра за 2 и 10 мин;
- среднее направление ветра за 2 и 10 мин;
- порывы направления ветра за 10 мин;
- средние квадратические отклонения скорости и направления ветра;
- вертикальный сдвиг ветра.

Обзор литературы показывает, что комплексного исследования по выбору этих характеристик для измерений параметров ветра ранее не проводилось. В основном изучались одна-две характеристики для определенных географических пунктов. Наибольшее количество работ посвящено выбору оптимального интервала осреднения параметров ветра, т.е. такого интервала, который позволяет получить статистически устойчивые оценки средних значений, которыми можно пользоваться в ближайшие 30-60 мин после измерений. В этих работах предлагается интервал осреднения 10 мин для устойчивой стратификации атмосферы, 15 и 20 мин для безразличной и неустойчивой стратификации соответственно.

В 70-х годах в связи с повышением интенсивности полетов появился ряд работ, в которых изучался вопрос репрезентативности информации для небольших отрезков времени, достаточных для осуществления самолетами таких операций, как взлет, посадка, руление, подход к аэродрому, полет по кругу. В работах /6, 7/ было показано, что в зависимости от заблаговременности инерционного прогноза целесообразно рекомендовать следующие временные интервалы осреднения:

- при заблаговременности 1-4 мин необходимо осреднять за 2-4 мин;
- при заблаговременности свыше 4 мин - за 5-10 мин.

При таких интервалах осреднения наблюдается минимум средней квадратической разности между прогнозируемой на заданный интервал и действительной скоростью ветра. В качестве примера в табл. I

Таблица I

Процент частоты ошибок, превышающих различные пороги

Интервал осред- нений, мин	Интервал прог- нозирования, мин	Значение порога, м/с			
		3	5	7	10
2	2	6,56	0,44	0,086	0,019
	5	8,19	0,80	0,196	0,049
	10	10,98	1,23	0,319	0,104
5	2	5,12	0,41	0,095	0,028
	5	6,62	0,70	0,193	0,058
	10	9,36	1,03	0,316	0,101

приведены экспериментальные данные /6, 7/, полученные в аэропорту Хитроу (Англия), и процент частоты ошибок, превышающих определенные пороги при различных интервалах осреднения и прогнозирования.

Из данных этой таблицы и графиков, которые приводят авторы, не видно больших преимуществ 2-минутного осреднения по сравнению с 5-минутным при заблаговременности прогноза 2 мин. Авторы дают свои вышеприведенные рекомендации на основании того, что при 2-минутном осреднении меньше больших ошибок.

При обслуживании авиации необходимо учитывать не только временную, но и пространственную изменчивость параметров ветра. Как показали исследования на Токийском аэродроме /8/, пространственная изменчивость параметров ветра в отдельных случаях может достигать значений, влияющих на безопасность взлета и посадки самолетов. Так, например, наблюдались ситуации, когда горизонтальные сдвиги скорости ветра достигали 5 м/с, а направления — до 90° на протяжении ВПП. На основании этой работы даются предложения об измерении параметров ветра не менее чем в двух точках. Выбор этих точек должен быть подчинен задаче более полной оценки ветрового поля для всей территории аэродрома. Несомненной является необходимость одновременного измерения параметров ветра вблизи порогов ВПП.

Аналогичные результаты были получены в ГГО при исследовании изменчивости параметров ветра в аэропорту Пулково. В частности, максимальные значения коэффициентов корреляции осредненных за интервал 10 мин значений скорости ветра в двух точках на расстоянии

3 км достигали 0,7-0,8, а направления 0,5-0,7. В то же время минимальные значения для отдельных реализаций опускались до 0,1. При этом следует отметить большие средние квадратические отклонения направления ветра, достигающие для мгновенных отсчетов 15° , а для средних за 2 и 10 мин соответственно 8 и 4° .

Помимо средних характеристик важное значение для обеспечения безопасности полетов имеют экстремальные характеристики (порывы) ветра. Известно, что наиболее опасное воздействие порыва ветра на летательный аппарат наступает в момент, когда вихрь порыва охватит его полностью. Если, например, размах крыльев самолета составляет 15-40 м, то вихрь успеет охватить самолет полностью за 1-3 с при скорости ветра 15 м/с. Исходя из этого, при измерении максимальных значений мгновенной скорости ветра необходимо осреднять последнюю за 1-3 с при обеспечении операций руления и разбега самолетов.

Время осреднения максимального порыва, воздействующего на самолет при посадке или взлете, следует определять исходя из времени его релаксации при внешнем воздействии на него. Среднее время релаксации принято равным 1,5 с /5/. При посадочной (взлетной) скорости около 70 м/с это время соответствует 100 м пути, пройденного воздушным судном, а следовательно, такому размеру вихря, опасного для самолета. Для скорости ветра 15 м/с эквивалентное время осреднения порыва должно составлять 6,5 с. В ряде работ /3/ показано, что наибольшее влияние на усталостную прочность самолета оказывают циклические нагрузки частотой 0,3 Гц, т.е. 3-секундные порывы.

Из сказанного следует, что осреднение мгновенной скорости ветра за 3 с будет удовлетворительным компромиссом для решения этих задач. Можно отметить, что современные ветроизмерительные приборы (М-63М-1, датчик КРАМС) при определении максимальной скорости ветра производят осреднение ветра за 3-секундный интервал.

Сложнее дело обстоит с определением интервала времени, на котором надо определять максимум. Обзор литературы показал отсутствие исследований по этому вопросу. Тем не менее ИКАО рекомендует определять максимальную скорость ветра за интервалы 2 и 10 мин, а порывы направления ветра за 10 мин.

Правила обслуживания полетов, принятые в СССР, предусматривают определение максимальной скорости ветра только за 2-минутные интервалы V_{m2} . При таком подходе значения V_{m2} выдаются диспетчерам и пилотам для обеспечения различных операций, таких как взлет самолета, подход, посадка, руления, и потребители информа-

ции используют ее для инерционного прогноза порывов ветра на время выполнения этих операций, т.е. на интервалы от 1 до 20 мин.

Как уже выше отмечалось, в ГГО проводились экспериментальные исследования изменчивости различных характеристик ветра. На основании этих данных были получены различные статистические характеристики временной и пространственной изменчивости параметров ветра. Оценка изменчивости характеристик ветра проводилась также расчетным путем с использованием аппарата теории выбросов и корреляционного анализа. Эти результаты были использованы, в частности, для оценки погрешности ступенчатого (инерционного) прогноза различных характеристик скорости ветра и выработки рекомендаций по их уменьшению. Остановимся на экстремальных характеристиках скорости ветра.

В работах [1, 2] было показано, что для оценки интегрального распределения максимальной скорости ветра H_m за интервал T , значительно превышающий интервал корреляции процесса $x(t)$, может быть использовано выражение

$$F(h_m) = \exp\{-\exp[2 \ln \mu(T) - h_m \sqrt{2 \ln \mu(T)}]\}, \quad (1)$$

где $\mu(T) = T\sigma_x / 2\pi\sigma_x$, $h_m = H_m/\sigma_x$, σ_x^2 и σ_x^2 - дисперсия процесса $x(t)$ и его производной.

Это выражение после небольших преобразований было использовано для аппроксимации экспериментальных гистограмм распределения максимальной скорости ветра за интервалы 2 и 10 мин. При аппроксимации предполагалось, что корреляционная функция мгновенной скорости ветра определяется показательной функцией, а интервал корреляции T_k лежит в пределах 10-50 с. Возможность такого подхода подтверждается рядом работ, при этом показано, что значения зависят от состояния атмосферы и лежат в пределах 27-47, 15-27 и 12-18 с для неустойчивой, безразличной и устойчивой стратификации соответственно. Расчет распределения производился при значениях T_k , равных 48 и 12 с, и с учетом того, что максимальные значения скорости ветра $V(t)$ нужно получать путем осреднения мгновенной скорости $v(t)$ за интервал $T_1 = 3$ с (т.е. $V(t) =$

$$= \frac{1}{T_1} \int_{t-T_1}^t v(t) dt).$$

На рис.1 приведены кривые интегрального распределения максимальной скорости ветра за интервалы 2 и 10 мин (h_{m2} и h_{m10}).

На основании выражения (1) были получены также численные оценки математических ожиданий и средних квадратических отклоне-

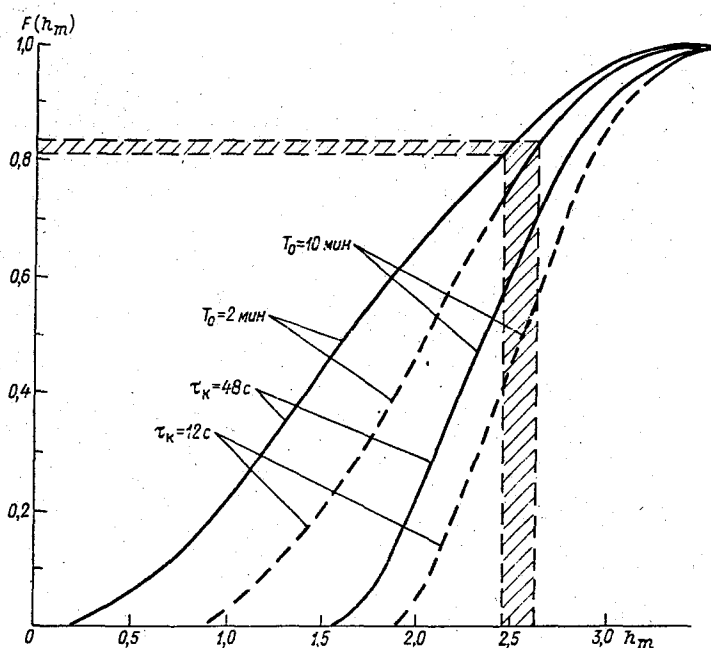


Рис.1. Распределение максимальной скорости ветра за различные интервалы времени T_0 .

ний величин h_{m2} и h_{m10} . Результаты расчета приведены в табл.2. Из табл.2 видно следующее:

а) математическое ожидание максимума за интервал 10 мин меньше зависит от состояния атмосферы (интервала τ_k), чем за интервал 2 мин;

б) средние квадратические отклонения σ_{h_m} , а особенно отношения $\sigma_{h_m}/\bar{h}_m$, за 10-минутные интервалы значительно меньше, чем за 2-минутные.

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальная скорость ветра, определяемая на интервале 10 мин, является более устойчивой характеристикой, чем осуществляемая за 2 мин. Кроме того, использование этой характеристики для расчета ожидаемой максимальной скорости ветра на 2-минутном интервале повышает точность ступенчатого прогноза. Действительно, если для оценки максимальной скорости ветра на интервале T_i используется математи-

Таблица 2

Расчетные значения σ_{h_m} , $\bar{h}_m$ и σ_{h_m}/h_m при различных интервалах наблюдения T_0 и корреляции τ_k

Интервал наблюдения мин	Характеристика	Интервал корреляции τ_k с		
		12	24	48
2	$\bar{h}_{m2}$	1,96	1,86	1,71
	$\sigma_{h_{m2}}$	0,715	0,830	1,0
	$\sigma_{h_{m2}}/\bar{h}_{m2}$	0,362	0,447	0,586
10	$\bar{h}_{m10}$	2,59	2,53	2,44
	$\sigma_{h_{m10}}$	0,435	0,535	0,578
	$\sigma_{h_{m10}}/\bar{h}_{m10}$	0,190	0,211	0,237

ческое ожидание максимальной скорости ветра на предшествующем интервале T_{i-1} , то дисперсию такой оценки можно определить из выражения

$$D_{h_m} = D_{h_{mi-1}} + D_{h_{mi}}$$

с учетом того, что при достаточно больших значениях T_i , T_{i-1} коэффициент корреляции величин h_{mi} и h_{mi-1} близок к нулю. Поэтому, как видно из табл.2, среднее квадратическое отклонение σ_{h_m} будет лежать в пределах 1,4-2,0. В то же время, если максимальную скорость на 2-минутном интервале определять расчетным путем, используя математическое ожидание $\bar{h}_{m10}$ на предыдущем отрезке, то σ_{h_m} будет находиться в пределах 1,1-1,6, т.е. при таком подходе точность инерционного прогноза повышается на 25-30 %, а если стоит задача прогноза математического ожидания h_{m2} , то точность будет еще выше.

Целесообразность использования интервала 10 мин для определения V_m видна также из кривых интегрального распределения $F(h_m)$ на рис.1.

На этих кривых отмечена зона возможных отклонений h_m за 10-минутные интервалы, зависящая от τ_k (показана штриховкой), и соответствующая ей зона вероятностей $F(h_m)$ экстремумов за 2-минутные интервалы. Из графика видно, что математическое ожидание

абсолютного экстремума за интервал 10 мин представляет собой такое значение, вероятность неперевышения которого абсолютным максимумом за 2 мин составляет 0,8-0,84. Следовательно, максимальную скорость ветра за 10-минутный интервал можно использовать как устойчивую порывов ветра и на 10-минутном, и на 2-минутном интервале.

Такой же подход можно использовать для оценки погрешности определения максимальной скорости ветра от инерции прибора и частоты измерений $/I/$. На рис.2а приведены кривые зависимости систематической погрешности определения максимальной скорости ветра от дискретности отсчетов Δ на интервалах наблюдения 2 и 10 мин, а на рис.2б - зависимость (I) влияния частотных характеристик преобразователя скорости (постоянной времени T_{ϕ}) на максимальную скорость (математическое ожидание h_m). Интересно отметить, что снижение влияния дискретности наблюдений и частотных характеристик на погрешность определения максимальной скорости ветра может быть достигнуто путем выбора оптимальных значений Δ и T_{ϕ} для конкретного значения интервала осреднения T_1 . Для этого можно использовать кривые зависимости математического ожидания h_{m1} максимального значения скорости ветра от интервала T_i (кривые 2 рис.2б). В настоящее время в связи с внедрением микропроцессорной техники в измерительные приборы вместо подбора оптимальных значений Δ и T_{ϕ} целесообразно расчетным путем вносить поправки в результаты определения экстремальных характеристик в зависимости от частотных свойств чувствительных элементов и используемой дискретизации.

В заключение сформулируем предложения по выбору методов и характеристик измерений параметров ветра.

1. Информация о скорости ветра должна включать текущие значения, репрезентативные для интервала 0-2 мин, и более устойчивые характеристики, репрезентативные для интервала 10-20 мин.

2. Текущие значения должны характеризовать возможные средние и максимальные значения скорости ветра для интервала экстраполяции 0-2 мин.

На основе анализа погрешности экстраполяции средних и максимальных значений за интервал 2 мин получено:

- принятая в настоящее время выдача среднего за предшествующие моменту выдачи 2 мин далека от оптимума, получаемого при прогнозе среднего за 2 мин, но все же достаточно рациональна;
- принятая сейчас выдача максимальной скорости ветра за 2 мин, как прогнозируемого на такой же интервал максимума, нера-

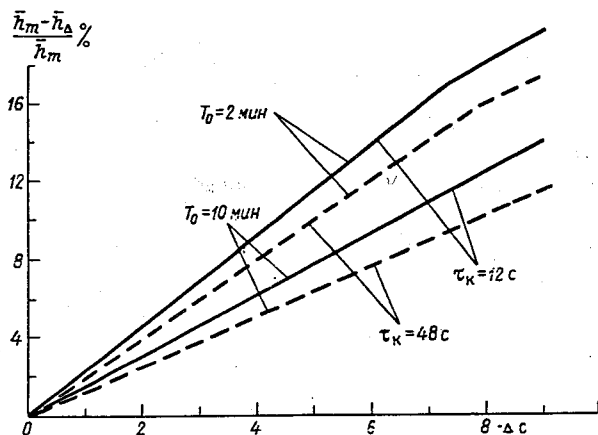


Рис.2а. Зависимость погрешности измерения V_m от шага дискретизации Δ .

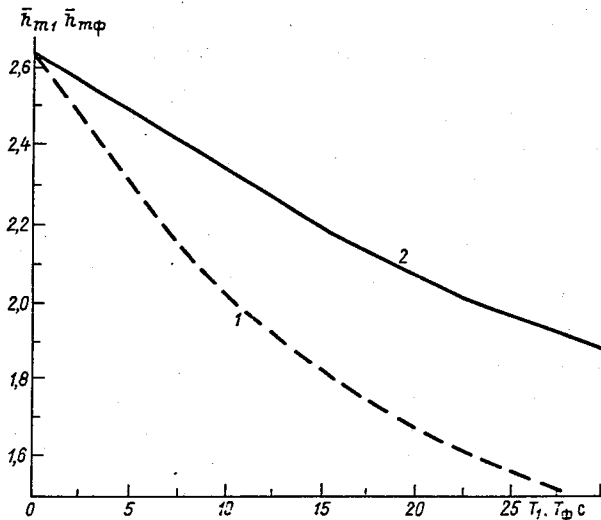


Рис.2б. Влияние интервалов осреднения T_i и сглаживания T_ϕ на величину V_m при $T_0 = 10 \text{ мин}$.

$$1) V_\phi(t) = \frac{1}{T_\phi} \int_{t-T_1}^{\infty} v(t-t') e^{-\frac{t'}{T_\phi}} dt';$$

$$2) V(t) = \int_{t-T_1}^t v(t') dt'.$$

циональна вследствие малой достоверности этой характеристики.

Рекомендуется в качестве характеристики максимума ветра на 2-минутном интервале выдавать значение максимума на предшествующем 10-минутном интервале. При 10-минутном интервале получаем максимум за 2 мин примерно с 80 %-ной обеспеченностью. Значение среднего отклонения максимума за 10-минутный интервал от среднего значения скорости ветра примерно в 1,3-1,4 раза больше среднего отклонения для 2-минутного интервала.

3. Принятый в настоящее время интервал осреднения при выдаче максимальной скорости ветра, равный 3 с, является некоторым компромиссом для ряда задач авиационной метеорологии, связанных с воздействием ветра на воздушное судно, т.е. достаточно рационален.

В работе приведены зависимости максимальной скорости ветра от интервала осреднения и интервала, за который определяется максимум. Эти зависимости позволяют оценить значение максимальной скорости при другом интервале осреднения (и при необходимости ввести поправку в показания прибора).

Приведены также соотношения для погрешности определения максимальной скорости ветра в функции от инерции прибора и частоты измерений и даны рекомендации по выбору этих параметров.

4. Более устойчивые характеристики ветра в районе аэродрома должны давать информацию о ходе средней скорости и возможных отклонениях от средней на интервал 10-20 мин. Эта задача краткосрочного прогноза (в общем случае с привлечением измерений в ряде точек аэродрома). С этой целью в первом приближении могут быть использованы характеристики, принятые в настоящее время: среднее и максимальное значения скорости ветра за 10-минутный интервал, предшествующий моменту выдачи.

Измеренное значение максимума позволяет определить с приемлемой точностью также изменчивость скорости ветра (среднее квадратическое отклонение σ_v). Поэтому измерение σ_v , предлагаемое в ряде работ, может быть излишним.

Интервал 10 мин целесообразно использовать для определения средней и максимальной скорости, а также направления в сообщениях, передаваемых в другие аэропорты (код ФАП) и диспетчерам подхода и круга, вместо принятого сейчас интервала 2 мин.

5. В качестве среднего направления ветра, выдаваемого в составе текущих данных, может быть принято среднее за 2-минутный интервал, предшествующий моменту выдачи, что, в целом, соответствует практике метеоизмерений.

В дополнение к этой информации представляется необходимой выдача информации о возможных порывах ветра по направлению. Форма представления данных о порывистости по направлению (среднее квадратическое значение или экстремальные значения направления, соответствующие максимальным отклонениям от среднего), требования к осреднению при определении порыва, интервал, на котором определяется порывистость по направлению, требуют дополнительного уточнения. Допустимо принять, например, осреднение 3 с и выдачу крайних значений осредненного направления за интервал 10 мин.

Представляет интерес также рассмотреть выдачу информации о скорости и направлении ветра в виде средних и экстремальных значений составляющих ветра вдоль и поперек ВПП.

6. Способ измерения скорости ветра должен обеспечивать непрерывное скользящее формирование максимальной скорости (и направления), что и определяет требования при цифровой обработке к периодичности измерений - не более 1-3 с (см. п.3).

Периодичность формирования и выдачи выходных данных о скорости и направлении ветра (средних и максимальных значениях) должна быть не более 15 с (т.е. интервал обновления данных 15 с).

Отметим, что для экстремальных значений это означает выдачу информации о порыве ветра, превышающем предшествующие на интервале определения экстремума, с задержкой не более чем на 15 с и сохранение этой информации в течение указанного интервала, даже если такой порыв не повторится.

7. Полученные данные о пространственной изменчивости параметров ветра (недостаточная корреляция даже осредненных за 10 мин значений скорости и направления ветра в двух точках аэродрома) подтверждают необходимость используемой в настоящее время выдачи данных о ветре с рабочего старта.

Однако этого недостаточно. Необходима система измерения поля ветра в районе аэродрома, обеспечивающая выявление опасных горизонтальных сдвигов ветра и опасных явлений типа шквалов. В минимальной конфигурации такая система может включать датчики ветра, установленные у порога и в конце двух ВПП, и дополнительный датчик в середине аэродрома. Очевидно, при этом не требуется заметных дополнительных затрат. Необходимы лишь, как указывалось выше, параллельные измерения параметров ветра измерительной системой во всех точках, где установлены датчики, с возможностью вывода данных на дисплей метеоролога. Выявление опасных горизонтальных сдвигов может быть автоматизировано уже на первом этапе путем, например, контроля превышения порогового значения модулем разности векторов скорости ветра.

Список литературы

1. А н и с к и н Л.В., П е р с и н С.М. Влияние инерционности приборов и дискретности наблюдений на погрешность измерения экстремальных характеристик случайного процесса // Труды ИГО. - 1974. - Вып.342. - С.35-45.
2. А н и с к и н Л.В., П е р с и н С.М. Распределение абсолютного экстремума случайного процесса // Труды ИГО. - 1976. - Вып.346. - С.10-15.
3. Л у ц к и й В., Г а л а ш и н Е. Вибрация самолета в полете // Авиация и космонавтика. - 1969. - № 7. - С.15-21.
4. Нормы годности к эксплуатации в СССР оборудования гражданских аэродромов и воздушных трасс (НГЭО-81). - М.: Воздушный транспорт, 1983.
5. Ю д и н М.И. Вопросы теории турбулентности и структуры ветра с приложением к задаче колебания самолета // Труды НИУ ГИМС. - 1946. - Сер. I, вып.35.
6. D u t t o n M. Optimum averaging time of wind reports for aviation // Meteorol. Mag. - 1975. - P.231-243.
7. H a r d y R. A note on the optimum averaging time of wind reports for aviation // Meteorol. Mag. - 1974. - P.99-105.
8. S h i o t o n i M., I w a t o n i F. Horizontal space correlations of velocity fluctuance during strong winds // J. Meteorol. Soc. Jap. - 1976. - Vol.54, N 1. - P.59-67.

РЕТРОРЕФЛЕКТОРЫ ДЛЯ ТРАНСМИССОМЕТРОВ

Отражатели, используемые в трансмиссометрах, должны обладать свойством возвращать свет на источник излучения в пропорции, слабо зависящей от пространственной ориентации собственной оптической оси. Такие отражатели называют ретрорефлекторами /6/.

Анализ опубликованных в общетехнической и патентной литературе работ показывает, что наряду с широко известным триппель-призмным отражателем /3/ в качестве ретрорефлектора используется также отражатель типа "кошачий глаз". Как показано в работе /4/, обязательными конструктивными элементами такого отражателя являются зеркальный, или линзовый, фокусирующий объектив и сферическое зеркало, установленное в фокальной плоскости объектива. Не располагая этой информацией, авторы более поздних работ /1, 5/ предлагали в фокальной плоскости объектива устанавливать плоское зеркало. Такие отражатели были применены в первых фотометрах для измерения метеорологической дальности видимости /5/. Однако их эксплуатационные характеристики оказались неудовлетворительными, поскольку они были чувствительны к пространственным смещениям оптической оси. Вероятно, поэтому в трансмиссометрах типа РДВ-2 и РДВ-3 в качестве ретрорефлектора был принят к использованию триппель-призмный отражатель. Спустя некоторое время возникла необходимость уменьшить длину измерительной базы РДВ с целью расширения диапазона измерения в сторону низких значений прозрачности атмосферы. При попытке использовать на укороченной измерительной базе прежнюю конструкцию отражателя выяснилось, что приборы типа РДВ становятся чувствительными к взаимным пространственным смещениям оптических осей излучателя и отражателя. Это обстоятельство было учтено при разработке нового двухбазового фотометра ФИ-1 /2/, в котором на укороченной измерительной базе применен отражатель типа кошачий глаз. Однако вскоре выяснилось, что в конкретных условиях применения на местах эксплуатации, а также при выполнении экспериментальных исследований целесообразно использовать ФИ-1 на промежуточных измерительных базах. В связи с этим вновь возник вопрос о границах применимости используемых в трансмиссометрах различных конструкций отражателей. В метеорологическом приборостроении публикации по этому вопросу отсутствуют. Необходимые теоретические сведения о ретрорефлекторах изложены в узкоспециальной литературе. Отсутствие доступной исходной инфор-

мации о критериях выбора конструкции отражателя применительно к трансмиссометрам ставит разработчика в затруднительное положение, заставляя всякий раз при проектировании заново осуществлять поиск правильных решений. Данная работа имеет цель частично восполнить этот пробел.

Выполним сравнительную оценку характеристик двух основных типов ретрорефлекторов, используя литературные источники и опыт эксплуатации приборов типа РДВ и ФИ-1.

Широко применяемый на практике трипсель-призмный отражатель является разновидностью углового отражателя и имеет превосходные характеристики ретрорефлектора. Однако он обладает рядом существенных недостатков /4/. Такому отражателю свойственны большие светопотери ввиду трехкратного отражения светового пучка, а также большая трудоемкость изготовления, которая объясняется высокими требованиями к точности обработки и идентичности углов между гранями призмы. Три зеркальные плоскости и шесть юстировочных осей вращения обуславливают сложность и дороговизму юстировки данного устройства. Самым крупным эксплуатационным недостатком такого отражателя в применении к трансмиссометрам является невозможность регулировки угла расходимости отраженного пучка. По этой причине для каждой длины измерительной базы трансмиссометра требуется изготавливать трипсель-призмы с определенным углом между гранями, отличным от 90° . В противном случае световой пучок не попадет на приемное зеркало, а будет смещаться либо за края зеркала по мере удаления отражателя от фотометрического блока, либо к центру зеркала по мере приближения отражателя к источнику излучения. Во втором случае возвращенный отражателем пучок света попадет на излучающий объектив, который в приборах РДВ-2 и ФИ-1 расположен соосно с приемным зеркалом, экранируя его центральную часть. Сказанное иллюстрируется рис.1, где приняты следующие обозначения: 1 - приемная поверхность зеркала, 2 - излучающая поверхность объектива, 3 - пучки света от трипсель-призмного отражателя при правильном его расположении относительно фотометрического блока, 3а - при удалении отражателя, 3б - при приближении отражателя к излучателю. В отличие от РДВ-2 и ФИ-1 в приборе РДВ-3 оптические оси излучающего объектива и приемного зеркала не совпадают. Это показано на рис.2, где приняты те же обозначения, что и на рис.1.

Из рисунка видно, что в приборе РДВ-3 нерационально используется энергия возвращенного отражателем пучка света (одна треть всей энергии). Кроме того, нетрудно сделать вывод о том, что та-

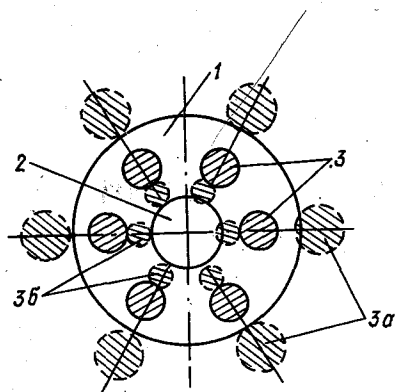


Рис. I

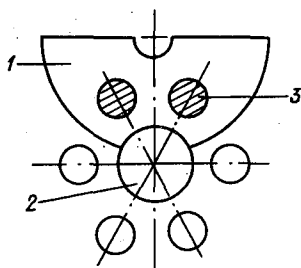


Рис.2

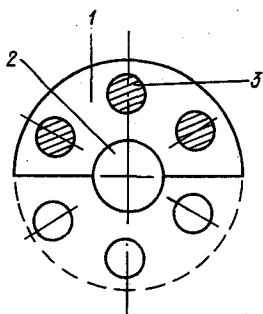


Рис.3

кая оптическая схема, несмотря на отсутствие экранировки центральной части зеркала, более чувствительна к смещению возвращенных отражателем пучков света в сторону объектива. Именно по этой причине оказалось невозможным использовать РДВ-3 на укороченной измерительной базе и пришлось использовать для этой цели приборы РДВ-2. В приборе ФИ-I, как и в РДВ-3, оптические оси излучателя и приемного зеркала совпадают, однако зеркало заимствовано от РДВ-3. Чтобы максимально использовать возвращенную отражателем световую энергию, трипель-призмы в отражателе ФИ-I развернуты в плоскости, перпендикулярной оптической оси, на угол 90° . По этой

причине зеркало захватывает половину энергии светового поля отражателя (три из шести пучков света). Это хорошо видно на рис.3. Из сказанного следует, что в тришпелль-призмменном отражателе все призмы должны быть одинаково ориентированы по отношению к его оптической оси, в противном случае трудно гарантировать требуемые эксплуатационные характеристики в конкретной оптической схеме прибора.

Рассмотрим теперь кратко основные свойства отражателя типа "кошачий глаз". Из рис.4 видно, что такой отражатель содержит объектив 1 и сферическое зеркало 2. Радиус кривизны зеркала R равен фокусному расстоянию объектива F . Нетрудно видеть, что при указанных условиях центральный луч объектива независимо от угла наклона φ к оптической оси объектива оказывается всегда нормальным к поверхности сферического зеркала, в силу чего возвращается на источник излучения. В таком отражателе всего один критичный размер — расстояние между объективом и зеркалом. Если конструктивно обеспечить регулировку этого размера, то можно при настройке отражателя скомпенсировать неточность изготовления его компонентов, что значительно удешевляет его производство. В работе /4/ показано, что даже при поле зрения 10° отклонение, даваемое таким отражателем, отличается от идеального не более чем на $5''$. В этой же работе делается вывод о том, что задача юстировки ретрорефлектора типа кошачий глаз с полем зрения 1° тривиальна. В пределах угла наклона 1° отражатель поворачивает лучи точно на

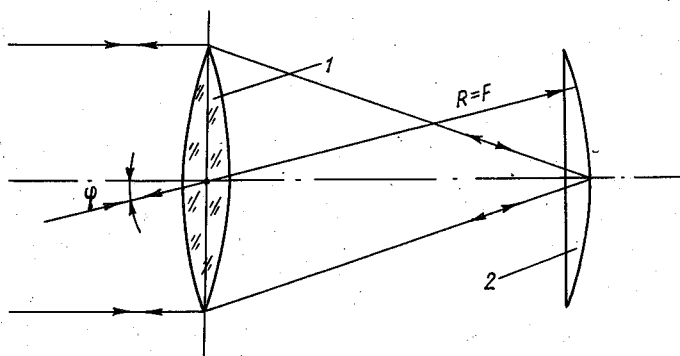


Рис.4

180°. Если в качестве объектива использовать объектив типа "сфорогон", у которого фокальная поверхность сферическая, а не плоская, то можно гарантировать близкие к идеальным характеристики ретрорефлектора при условии, что радиусы кривизны фокальной поверхности и поверхности зеркала одинаковы. В отличие от трипель-призменного отражателя такой отражатель возвращает на источник излучения световой поток в виде сплошного пучка круглого сечения. В идеальном случае пучок является параллельным. Если же изменять расстояние между объективом и зеркалом, то можно менять расходимость отраженного светового пучка, т.е. регулировать количество световой энергии, попадающей на приемное зеркало трансмиссометра.

Необходимо отметить, что рассмотренный ретрорефлектор, содержащий линзовый объектив и сферическое зеркало, является разновидностью классического отражателя типа кошачий глаз, подробно рассмотренного в работе /6/. В классическом отражателе используется зеркальный объектив. Лучшие результаты дает параболическое зеркало. Вторичное (отражающее) зеркало должно быть, как и в рассмотренном зеркально-линзовом отражателе, сферическим. Однако оно может иметь как вогнутую, так и выпуклую поверхность. Тем не менее лучшие результаты дает вогнутое вторичное зеркало. Предельный угол наклона лучей к оси для выпуклого зеркала составляет 2,3°, в то время как для вогнутого зеркала этот угол в 2 раза больше (примерно 5°) /6/.

Завершая сравнительный анализ характеристик рассмотренных ретрорефлекторов, можно сделать следующие выводы.

Отражатель типа кошачий глаз имеет более универсальные эксплуатационные характеристики. Одна и та же конструкция отражателя с регулировкой расстояния между объективом и сферическим зеркалом может быть использована на различных измерительных базах трансмиссометра. Такой отражатель прост в изготовлении, а неточность изготовления компонентов отражателя легко компенсируется при настройке. При соответствующем усложнении отражателя можно гарантировать более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с трипель-призменным отражателем. Трипель-призменный отражатель не может быть использован на различных измерительных базах без изменения конструктивных параметров. Возможность корректировки свойств отражателя после изготовления отсутствует. Для такого отражателя характерны высокая трудоемкость и стоимость изготовления. Отраженный пучок имеет не сплошную пространственную структуру в поперечном сечении, что приходится учитывать при использова-

нии в конкретной оптической схеме трансмиссометра. Такие отражатели целесообразно использовать на больших измерительных базах протяженностью более ста метров, поскольку для таких расстояний потребуется соответствующее усложнение конструкции и удорожание отражателя типа кошачий глаз.

Список литературы

1. А.с. I08030. СССР, кл.42с. Зеркально-линзовый отражатель / В.А.Величко, К.А.Чудина. - Оpubл. I.I2.I956. - Бюл. изобретений. - I956. - № 22.

2. А.с. 382037. СССР. МКИ ОI I/00. Устройство для измерения прозрачности атмосферы / В.Е.Карпуша, Р.А.Круглов, М.С.Стернзат, С.Д.Плинта. - Заявл. 23.08.71; Оpubл. 22.05.73. - Бюл. изобретений. - I973. - № 22.

3. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. - М.: Машиностроение, I973. - 234 с.

4. Белл Р.Дж. Введение в фурье-спектроскопию. - М.: Мир, I975. - С.322-337.

5. Гаврилов В.А. Прозрачность атмосферы и видимость. - Л.: Гидрометеиздат, I958. - С.I28.

6. Патент № 29360I2 ФРГ. - Кл. 02В 5/I2, I98I.

7. Веер R., Маржаньени D. Wavefronts and construction tolerances for a cat's-eye retroreflection // Appl. Opt. - I966. - N 5. - P.II9I.

Ю.А.Житарев, Н.А.Плешкова,
Е.В.Романов

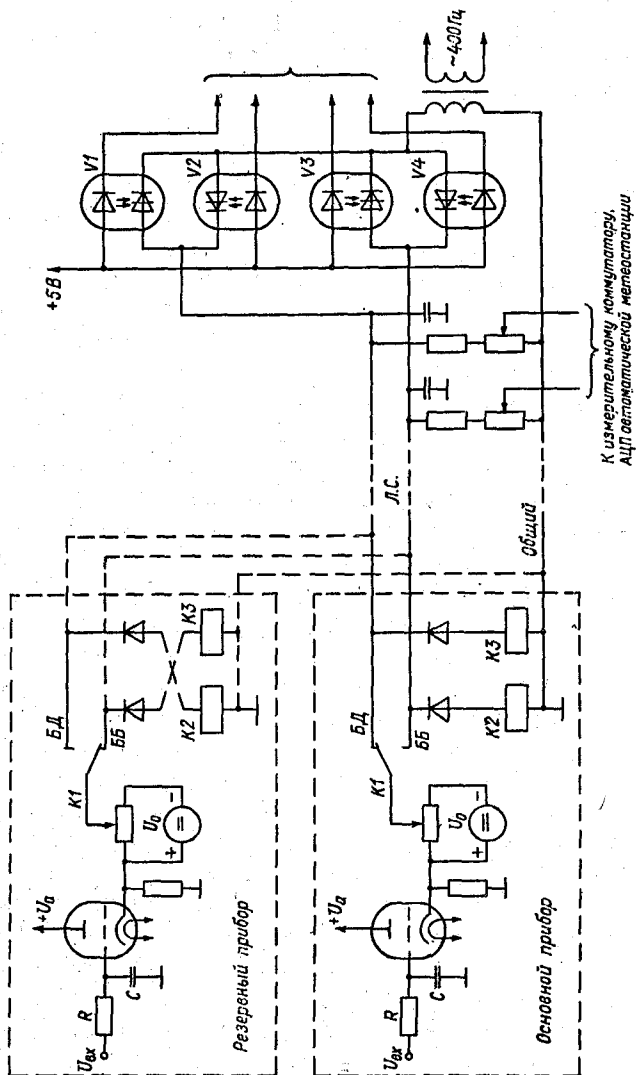
О ПОВЫШЕНИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОКАЗАНИЙ БАЗИСНЫХ ФОТОМЕТРОВ ФИ-І ПРИ РАБОТЕ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ

Импульсный базисный фотометр ФИ-І /2/ является одним из основных приборов, применяемых при метеорологическом обеспечении взлетов и посадок воздушных судов на аэродромах гражданской авиации. В этом приборе в отличие от его предшественника РДВ-3 /3/ достигнуто расширение диапазона измерения по метеорологической дальности видимости (МДВ) до 50 м путем применения двух отражателей. Один отражатель установлен на расстоянии 100 м от фотометрического блока, что обеспечивает измерение МДВ в поддиапазоне 250-6000 м, второй отражатель, установленный на расстоянии 20 м, обеспечивает измерение МДВ в поддиапазоне 50-1200 м. При дальности видимости 250-1200 м прибор может поочередно работать с любым из двух отражателей (правда, не одновременно, по очереди).

В фотометре ФИ-І в отличие от РДВ-3 реализована схема прямого преобразования коэффициента пропускания (прозрачности) в электрический сигнал. Коэффициент пропускания представляет собой отношение интенсивности света, ослабленного атмосферой на измерительной базе, к интенсивности излученного не ослабленного атмосферой света. Коэффициент пропускания в приборе пропорционален выходному току фотоумножителя, который преобразуется в напряжение постоянного тока и после сглаживания RC -фильтром с большой постоянной времени $T = RC \approx 30$ с подается в канал связи.

Для уверенного определения поддиапазона на приемном конце в линии связи используются три жилы. На рисунке изображена схема выходных цепей фотометра ФИ-І при его подключении к автоматической метеостанции. Сигналы управления в виде импульсов напряжения отрицательной полярности поступают в цепь І (дальняя база БД) или 2 (ближняя база ББ), включая реле К2 или К3 соответственно. Срабатывая, реле К2 (К3) переводит в соответствующее положение (БД или ББ) релейный переключатель КІ. При этом в приборе переключаются оптические каналы (измерительные базы).

Дистанционное выключение питания фотометра обеспечивается одновременной подачей сигналов управления в оба измерительных канала. Включается прибор подачей одиночного сигнала управления в любой измерительный канал.



В автоматической аэродромной метеостанции на микропроцессоре /1/ сигналы управления предложено формировать при помощи тиристорных оптронов, включаемых на время подачи сигналов управления импульсами, подаваемыми от управляющего коммутатора. Из соображений универсальности платы сопряжения метеостанции с группой приборов видимости, высоты облаков и др., рассчитанных в общем случае на разнополярные сигналы управления, предусмотрено формирование как отрицательных (открываются тиристоры $V_1, V_3, \dots$), так и положительных импульсов (открываются тиристоры $V_2, V_4, \dots$).

В каждом измерительном канале имеется делитель из резисторов, позволяющий нормировать напряжение, подаваемое через измерительный коммутатор на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который также из соображений универсальности рассчитан на работу с измерительными сигналами любой полярности.

В рассмотренной схеме соединения ФИ-1 с автоматической метеостанцией один из измерительных каналов оказывается свободным, что позволяет подключить резервный прибор. Подключение резервного прибора (показан пунктиром на рисунке) выполняется параллельно основному к той же трехпроводной линии связи, при этом в резервном приборе изменяется подключение реле К2 и К3 к Л.С., как показано на рисунке. Тогда при подаче от станции сигнала включения основного прибора на дальнюю базу резервный прибор включается на ближнюю базу, и, наоборот, при включении основного прибора на ближнюю базу резервный прибор включается на дальнюю базу.

Подключение к автоматической станции резервных приборов ФИ-1 позволяет заметно поднять достоверность вырабатываемой информации о дальности видимости. Для этого следует периодически переключать приборы с базы на базу, сличая их показания на одной и той же базе, а также используя показания обоих приборов на разных базах в зоне перекрытия поддиапазонов 250-1200 м.

Может быть предложен следующий алгоритм работы и использования показаний двух приборов (основного и резервного). Во время обслуживания полетов при хорошей видимости, т.е. при МДВ не менее 2000 м необходимо периодически переключать приборы с базы на базу (например, каждые 2 мин) и сличать осредненные на скользящем интервале 10-30 мин показания приборов на общей базе. В случае заметных расхождений показаний приборов (более 3-4 % по коэффициенту пропускания) необходимо вырабатывать сигналы оператору для принятия оперативных мер к подстройке приборов. Указанная процедура в случае сходимости показаний дает уверенность, что при дальнейшем ухудшении видимости показания будут достоверны.

При дальнейшем ухудшении видимости переключение приборов с базы на базу следует прекратить и, начиная с некоторого порогового значения (например 1500 м), использовать оба отсчета МДВ как по каналу дальней базы одного (основного) прибора S_d , так и по каналу ближней базы второго (резервного) прибора S_b . Простейший метод использования показаний S_b и S_d в зоне перекрытия, который может быть рекомендован, — определение минимального значения МДВ и передача его в службу движения в качестве официального значения. Возможны другие подходы. Например, может производиться осреднение показаний с весами K_1 и K_2

$$S = K_1 S_d + K_2 S_b \quad (I)$$

На нижней границе зоны перекрытия $K_1 = 0$, $K_2 = 1$ и используются показания только S_b , на верхней границе $K_1 = 1$, $K_2 = 0$ и используются показания только S_d . Внутри диапазона перекрытия K_1 и K_2 могут изменяться по некоторому закону, например в простейшем случае линейному. В качестве аргумента для определения значений коэффициентов можно взять среднее значение видимости

$$\bar{S} = \frac{S_d + S_b}{2}.$$

Осреднение с весами по формуле (I) дает более гладкую, непрерывную зависимость МДВ во времени.

Предложенную методику сглаживания МДВ при переходе с базы на базу следует применять при относительно небольших расхождениях $|S_d - S_b| < (0,2 \dots 0,3) \bar{S}$. При больших расхождениях необходимо автоматически вырабатывать для оператора сигнал несогласованности показаний прибора на разных базах, выдавая при этом потребителю из соображений безопасности минимальное значение МДВ.

Подключение резервного прибора по схеме, представленной на рисунке, имеет недостаток: по общему проводу протекают токи от двух разных приборов, что приводит к взаимозависимости каналов и вносит дополнительную погрешность в результаты измерения. Эта погрешность может быть уменьшена повышением входного сопротивления делителей измерительных каналов в автоматической станции.

Список литературы

1. Автоматизация аэродромных метеорологических измерений с использованием микропроцессоров / Л.П.Афиногенов, С.И.Грушин,

С.В.Кузьминов, Е.В.Романов // Тез. докл. на Всесоюз. конф. по авиационной метеорологии, 8-12 сентября 1986 г. - М.: ВДНХ, 1986.

2. А.с. 382037. СССР. МКИ ОI I/00. Устройство для измерения прозрачности атмосферы / В.Е.Карпуша, Р.А.Круглов, М.С.Стернзат, С.Д.Плинта. - Заявл. 23.08.71; Оpubл. 22.05.73. - Бюл. изобретений. - 1973. - № 22.

3. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П.Афиногенова, Е.В.Романова. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - С.28-41.

А.А.Афанасьев, Е.В.Романов

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ГРУПП
ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ В МЕТЕОСООБЩЕНИЯХ
АВТОМАТИЧЕСКИХ АЭРОДРОМНЫХ СТАНЦИЙ

Одной из основных задач метеорологического обеспечения авиации является оперативное получение путем измерений и наблюдений исходной метеоинформации о фактической погоде на аэродроме, формирование (кодирование) метеорологических сообщений и максимально быстрая передача этих сообщений потребителям как внутри аэродрома, так и за его пределами по сети связи.

На авиационных метеостанциях контролируются инструментально (измеряются) параметры ветра, видимости (в том числе высота облаков), атмосферное давление, температура, влажность воздуха. Основные метеопараметры (гроза, гололед, осадки, метель, пыльные и песчаные бури и др.) контролируются, как правило, визуально (наблюдаются).

С целью повышения оперативности и достоверности метеоинформации процесс формирования метеосообщений автоматизируют. Эту задачу на аэродромах ГА СССР решает автоматическая станция типа КРАМС-МІ /4/, которая передает на средства индикации измерительную информацию о параметрах ветра, видимости, высоте облаков, давлении, температуре и влажности. Вручную вводится и может быть передана на отображение информация о грозе, гололеде и каком-либо еще одном опасном явлении (осадках, пыльной или песчаной буре, метели и т.д.). Однако процесс формирования метеосообщений, распространяемых по каналам связи в установленных метеокодах ФАП, МЕТАР, КН-ОІ, не автоматизирован в КРАМС-МІ из-за ограниченных возможностей ее вычислительного устройства по быстродействию, объему памяти и др. Использование микропроцессорных средств вычислительной техники при построении аэродромных автоматических метеостанций открывает широкие возможности в направлении более полной, комплексной автоматизации технологии метеообеспечения.

В аэродромной метеостанции на микропроцессорах /1/ запрограммированы автоматическое формирование и передача на узел связи упомянутых метеосообщений, причем как регулярных, формируемых в сроки наблюдений, так и специальных сообщений о существенных изменениях погоды (ФАП ШТ, SPECI).

Группы w'w' об атмосферных явлениях в момент наблюдения в разных метеокодах отличаются по числу символов и по составу. Так,

в телеграммах внутрисоюзного авиационного кода ФАП /5/ используется четырехсимвольное цифробуквенное обозначение каждого отдельного атмосферного явления (например, 42ТМ - туман, 64ДД - дождь сильный) по установленному перечню, содержащему 38 разных явлений.

Группа $w'w'$ может повторяться столько раз, сколько разных явлений нужно описать. При отсутствии явлений группа $w'w'$ опускается.

В международном коде METAR (SPECI) для кодирования групп $w'w'$ используется код 4678 /6/, содержащий перечень из 88 разных явлений погоды. Каждое явление кодируется двумя цифровыми разрядами от 04 до 99 и следующими за ними без пробела буквами (от двух до шести латинских букв). При необходимости описать несколько явлений погоды одновременно группа повторяется нужное число раз.

Внеочередные телеграммы в коде ФАП подаются при скорости ветра более 20 м/с и при возникновении (прекращении) некоторых атмосферных явлений (шквал, смерч, гроза, гололед) /3/.

Внеочередные телеграммы SPECI формируются при ряде изменений параметров ветра, видимости, а также при более полном перечне явлений погоды, их появлении, усилении, ослаблении или исчезновении (шквал, смерч, гроза, гололед, град, снег с дождем, поземок, пыльная или песчаная буря).

Наиболее полный перечень из ста явлений погоды предусмотрен в международном коде КН-I (FM12-VII SYNOP), однако в отличие от кодов ФАП и METAR (SPECI) передается в установленный срок наблюдений только одна группа следующей структуры: $7W_1W_2ww$, где 7 - условная цифра, ww - погода в срок наблюдений из перечня 00...99, W_1 , W_2 - погода между сроками наблюдений, по одной десятичной цифре, описывающей группу явлений погоды. Правила формирования W_1 и W_2 приведены в /2/.

Сравнение перечней явлений погоды, используемых в кодах ФАП, METAR и КН-01, позволило разработать для автоматической аэродромной метеостанции единую универсальную таблицу явлений погоды. В ней за основу взят перечень (множество) явлений погоды по коду КН-01. Перечни явлений, используемые в кодах METAR и ФАП, а также выдаваемые в службу движения аэропорта на блоки индикации БИ, выступают в качестве подмножеств. В таблице предусмотрена также графа W для прошедшей погоды.

Таблица заносится в постоянную память микроЭВМ автоматической метеостанции. В оперативной памяти предусмотрено несколько

ОСОБЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ

КН-ОІ		МЕТАР	ФАП	Явления погоды	Отображение (БИ)
00	0			Ясно	
01	1			Переменная облач- ность	
02	2			Пасмурно без измене- ний	
03	2			Пасмурно с ухудшени- ем	
04	4	04FU	04ДМ	Дым	Дымка
05	4	05HZ	05ПМ(СМ)	Мгла (снежная)	Мгла
06	4	06HZ	05ПМ	Мгла пыльная	"
07	3	08PO	08ПВ	Пыльный (песч.) вихрь слаб.	
08	3	08PO	08ПВ	Пыльный (песч.) вихрь разв.	
09	3	07SA*	30ПВ	Пыльная (песч.) буря	Пыльная буря
10	4	10BR	10ДК	Дымка	Дымка
11	4	11MIGF	11ТЗ	Поземный туман (клочками)	Туман
12	4	12MIGF	12ТП	Поземный туман (сплошной)	"
13	1		16ЗР	Зарница	
14	2			Осадки в поле зре- ния слаб.	
15	2			Осадки в поле зре- ния дальние	
16	2			Осадки в поле зре- ния ближние	
17	9	17TS*	17ГС*	Гроза сухая (без осадков)	Гроза
18	3	18SQ*	18ШВ*	Шквал	
19	3	19FC*	19СМ*	Смерч	
20	5	20REDZ		Недавняя морось	
21	6	21REKA		Недавний дождь	
22	7	22RESN		Недавний снег	

Продолжение таблицы

КН-ОИ		МЕТАР	ФАП	Явления погоды	Отображение (БИ)
23	7	23RERASN		Недавние дождь и снег	
24	6	24REFZRA		Недавний переохл. дождь	
25	8	25RESH		Недавние ливни	
26	8	26RESH		Недавние снежные ливни	
27	7	27REGR		Недавний град	
28					
29	9	29RETS		Недавние грозы (в т.ч. с осадками)	
30	3	30SA *	30ПБ	Пыльная (песч.) буря (ослаб.)	Пыльная буря
31	3	31SA *	30ПБ	Пыльная (песч.) буря умер. (неизм.)	То же
32	3	32SA *	30ПБ	Пыльная (песч.) буря умер. (усил.)	"
33	3	33XXSA *	30ПБ	Пыльная (песч.) бу- ря сильн. (ослаб.)	"
34	3	34XXSA *	30ПБ	Пыльная (песч.) буря (неизм.)	"
35	3	35XXSA *	30ПБ	Пыльная (песч.) буря (усил.)	"
36	3	36DRSN *	36ПЗ		Метель
37	3	37DRSN *	36ПЗ		"
38	3	38BLSN *	38МН		"
39	3	39BLSN *	75МТ		"
40	4	40BCFG	13ТР	Туман на расстоя- нии	Туман
41	4	41BCFG	11ТЗ	Гряды тумана	"
42	4	42FG	42ТМ	Туман	"
43	4	43FG	42ТМ	"	"
44	4	44FG	42ТМ	"	"
45	4	45FG	42ТМ	"	"
46	4	46FG	42ТМ	"	"

Продолжение таблицы

КН-ОТ		МЕТАР	ФАП	Явления погоды	Отображение (БИ)
47	4	47 FG	42ТМ	Туман	Туман
48	4	48 FZFG	42ТМ	Переохлажденный туман	"
49	4	49 FZFG	42ТМ	То же	"
50/20	5	50 DZ	50МР	Морось с перерывами, сильная	Морось
51/20	5	51 DZ	50МР	Морось непрерывная, слабая	"
52/20	5	52 DZ	50МР	Морось с перерывами, умеренная	"
53/20	5	53 DZ	50МР	Морось непрерывная, умеренная	"
54/20	5	54 XXDZ	54ММ	Морось с перерывами, сильная	"
55/20	5	55 XXDZ	54ММ	Морось непрерывная, сильная	"
56/20	5	56 FZDZ *	56МП*	Морось переохлад., слабая	Морось, гололед
57/20	5	57 FZDZ *	57ПТ*	Морось переохлад., сильная	То же
60/2I	6	60 RA	60ДЖ	Дождь с перерывами, слабый	Дождь
61/2I	6	61 RA	60ДЖ	Дождь непрерывный, слабый	"
62/2I	6	62 RA	60ДЖ	Дождь с перерывами, умеренный	"
63/2I	6	63 RA	60ДЖ	Дождь непрерывный, умеренный	"
64/2I	6	64 XXRA	64ДД	Дождь с перерывами, сильный	"
65/2I	6	65 XXRA	64ДД	Дождь непрерывный, сильный	"
66/24	6	66 FZRA *	66ДП*	Дождь переохлажденный слабый	Дождь, гололед
67/24	6	67 XXFZRA *	67ДП*	Дождь переохлажденный сильный	То же

Продолжение таблицы

КН-01		МЕТАР	ФАП	Явления погоды	Отображение (БИ)
68/23	7	68 RASN*	68ДС	Дождь со снегом, слабые	Снег
69/23	7	69 XX RASN*	58ДС	Дождь со снегом, сильные	"
70/22	7	70 SN	70СН	Снег с перерывами, слабый	"
71/22	7	71 SN	70СН	Снег непрерывный, слабый	"
72/22	7	72 SN	70СН	Снег с перерывами, умеренный	"
73/22	7	73 SN	70СН	Снег непрерывный, умеренный	"
74/22	7	74 XX SN	74СС	Снег с перерывами, сильный	"
75/22	7	75 XX SN	74СС	Снег непрерывный, сильный	"
76/22	7	-	78ЛИ	Ледяные иглы	"
77/22	7	77 SN	71СЗ	Снежные зерна	"
78/22	7	-	78ЛИ	Снежные кристаллы	"
79/22	7	79 PE	79ЛК	Ледяной дождь (кру- па)	"
80/25	8	80 RASH	80ЛД	Ливневый дождь сла- бый	Дождь
81/25	8	81 XX RA	80ЛД	Ливневый дождь уме- ренный	"
82/25	8	82 XX RA	80ЛД	Ливневый дождь сильный	"
83/26	8	83 RASN*	83СД	Ливневый дождь со снегом	Снег
84/26	8	84 RASN*	83СД	Ливневый дождь со снегом сильный	"
85/26	8	85 SNSH	85ЛС	Ливневый снег	"
86/26	8	86 XX SN	85ЛС	Ливневый снег силь- ный	"
87/27	7	87 GR	79ЛК	Ледяная (снежная) крупная-слаб.	"

Продолжение таблицы

КН-01		МЕТАР	ФАП	Явления погоды	Отображение (БИ)
88/27	7	88 GR	79ЛК	Ледяная (снежная) крупа сильн.	Снег
89/27	7	89 GR*	89ГР	Град	Град
90/27	7	90 XXGR*	89ГР	Град сильный	"
91/29	9	91 RA	60ДЖ	Дождь (недавн. гро- за)	Дождь
92/29	9	92 XXRA	64ДЦ	Дождь сильн. (не- давн. гроза)	"
93/29	9	93 GR*	96ГГ*	Крупа, град слаб. (недавн. гроза)	Град
94/29	9	94 XXGR*	96ГГ*	Крупа, град сильн. (недавн. гроза)	"
95/29	9	95 TS*	95ГЗ*	Гроза с дождем (снегом)	Дождь, гроза
96/29	9	96 TS*	96ГГ*	Гроза с градом (крупой)	Град, гроза
97/29	9	97 XXTS*	95ГЗ*	Гроза сильн. с дож- дем (снегом)	Дождь, гроза
98/29	9	98 TSSA*	98ГБ*	Гроза с пыльн. (песч.) бурей	Пыльная буря, гроза
99/29	9	99 XXTSGR*	99ГГ*	Гроза сильная с градом (крупой)	Град, гроза

ячеек, в которые оператор вводит вручную сведения о текущих атмосферных явлениях в коде КН-01 (две десятичные цифры на каждое явление).

Опасные атмосферные явления, перечисленные в колонке БИ, выдаются на средства отображения немедленно автоматически сразу после ввода. Опасные явления, помеченные в колонках ФАП и МЕТАР звездочкой, выдаются также немедленно автоматически в каналы связи в кодах ФАП ШТ и SPECI (явления погоды передаются при этом в виде предусмотренных комбинаций цифр и букв). В сроки наблюдений телеграммы ФАП и МЕТАР также выдаются автоматически с введенными на этот момент времени группами явлений погоды.

Телеграммы отбоя штормов вырабатываются автоматически после отмены ручным вводом соответствующих явлений с небольшой паузой

(2 мин для сообщений БИ и ФАП, 10 мин для сообщений SPECI).

В перечне явлений погоды имеется группа (позиции 20...29) "недавних" явлений, т.е. прекратившихся, но имевших место в течение последнего часа. Процесс подачи сообщений об этих явлениях может быть автоматизирован. В таблице (колонка ww) показано, какие явления переходят при их прекращении (это явления, связанные с осадками) в категорию недавних с указанием их нового кода (через косую черту). В ячейках оперативной памяти, хранящих эти явления, должны формироваться счетчики времени (на вычитание), устанавливаемые на 60 мин при вводе в них кода недавнего явления. По прошествии часа счетчик переходит через ноль и недавнее явление автоматически стирается из памяти ЭВМ.

Для сообщений, выдаваемых в коде КН-ОІ, может быть автоматизирован процесс формирования группы $W_1 W_2$ о прошедшей погоде. Для этого производится следующая процедура обработки текущих явлений ww .

Каждому введенному явлению ww (двухразрядный код) соответствует одnorазрядный код W прошедшей погоды (см. таблицу). В оперативной памяти выделены три ячейки, образующие стек, в которые автоматически вписываются коды W_1 и W_2 . Происходит это следующим образом.

После выдачи телеграммы в коде КН-ОІ стек очищается (обнуляется). Каждый раз, когда обнаруживается, что код ww завершившегося явления погоды больше кода, который хранится в выходной ячейке стека, в стек вводится этот новый код. В срок выдачи телеграммы сравнивается код W , соответствующий текущему явлению погоды ww , с кодом W выходной ячейки стека. Если код W текущего явления не равен коду выходной ячейки стека, последний идентифицируется с погодой W_1 , а код следующей за ней ячейки стека - с W_2 . Если код W текущего явления совпадает с содержимым выходной ячейки стека, то за W_1 и W_2 берется содержимое следующих за выходной двух ячеек стека.

Таким образом, на основе ручного ввода в оперативную память ЭВМ автоматической аэродромной метеостанции кодов текущих явлений погоды обеспечивается автоматическое формирование групп явлений погоды в телеграммах ФАП (ФАП ИТ), МЕТАР (SPECI), КН-ОІ, включая коды недавней погоды и погоды между сроками.

Дальнейшим развитием этого алгоритма должна быть автоматизация формирования кодов текущих явлений погоды на основе обработки сигналов от соответствующих датчиков - сигнализаторов (грозы, осадков, метелей и др.).

Список литературы

1. Автоматизация аэродромных метеорологических измерений с использованием микропроцессоров / Л.П.Афиногенов, С.И.Грушин, С.В.Кузьминов, Е.В.Романов // Тез. докл. на Всесоюз. конф. по авиационной метеорологии, 8-12 сентября 1986 г. - М.: ВДНХ, 1986.
2. Код для передачи данных гидрометеорологических наблюдений с наземных и морских наблюдательных станций КН-01 (международная форма FM I2-VII SINOP и FM I3-VII SHIP). - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - С.25-32.
3. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации СССР (НМОГА-82). - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - С.46-76.
4. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П.Афиногенова, Е.В.Романова. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 295 с.
5. Сборник авиационных метеорологических кодов. - М.: Гидрометеиздат, 1983. - С.27-28.
6. Сборник международных метеорологических авиационных кодов. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - С.44-46.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ (МОД)
В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Для выработки требований к аэродромным метеорологическим измерительным системам требуется исследование пространственной структуры МОД при ее значениях, близких к минимумам I и II категорий ИКАО. Несмотря на большое число работ по изменчивости МОД, целый ряд вопросов освещен явно недостаточно. Это прежде всего относится к материалам по пространственной изменчивости для малых пространственных интервалов (начиная со 0,01 метров и менее), а также к материалам по изменчивости для ситуаций, близких к опасным, к экстремальным характеристикам. Кроме того, полученные рядом авторов результаты носят противоречивый характер. Вместе с тем из результатов всех исследований следует очевидный вывод о значительной пространственной неоднородности поля МОД, особенно при ее значениях ниже 3 км, о недостаточной репрезентативности измерений МОД приборами с малой базой /2/. Более того, в /3/ автор приходит к выводам, что результат измерения МОД приборами с базой 50-100 м является случайным и что флуктуации помутнения имеют размеры от десятков до сотен метров.

Необходимо подчеркнуть, что имеющиеся результаты, свидетельствующие о значительной пространственной неоднородности поля МОД, получены по результатам измерений показателя ослабления (μ) базисными измерительными приборами. Расчет МОД производится по формуле

$$S = -\ln \varepsilon / \mu, \quad (I)$$

где S - метеорологическая оптическая дальность; ε - порог контрастной чувствительности глаза. Формула (I) получена в предположении о горизонтальной однородности показателя ослабления.

В данной работе ставится задача расчета характеристик МОД в оптически неоднородной атмосфере и оценки методических погрешностей определения МОД, вызванных допущением о горизонтальной однородности показателя ослабления.

Рассмотрим зависимость МОД от структуры поля показателя ослабления. В соответствии с определением МОД и определением коэффициента пропускания τ_x слоя атмосферы толщиной x /1/ для

случая, когда показатель ослабления μ зависит от координаты x , т.е. оптический путь в атмосфере не является однородным, а следовательно справедливо выражение (см. /4/)

$$\tau_x = \exp\left(-\int_0^x \mu(y) dy\right), \quad (2)$$

для МОД (S) будет иметь место соотношение

$$0,05 = \exp\left(-\int_0^S \mu(y) dy\right). \quad (3)$$

Найдем характеристики пространственной структуры поля МОД, определяемой соотношением (3), где $\mu(l)$ рассматривается как случайная функция координаты. Нахождение точного решения (3) в общем случае не представляется возможным. Для приближенного решения используется предположение, что функция $\mu(l)$ может быть представлена в виде

$$\mu(l) = \bar{\mu} + \mu^1(l) \quad (4)$$

и при этом $\mu^2(l) = o(\bar{\mu}^2)$.

Решение для дальности видимости ищется в виде

$$S = L_0 + \Delta S, \quad (5)$$

где

$$L_0 = -\ln \varepsilon / \bar{\mu}. \quad (6)$$

Разложив в ряд Тейлора в окрестности точки L_0 функцию $\int_0^S \mu(l) dl$ и взяв с учетом малости $\mu^1(l)$ только первые два члена разложения, получим

$$\ln \varepsilon = -\bar{\mu} L_0 - \int_0^{L_0} \mu^1(l) dl - \mu(L_0) \Delta S. \quad (7)$$

Из (6) и (7) находим выражения для ΔS и $S(x)$:

$$\Delta S = -\frac{\int_0^{L_0} \mu^1(l) dl}{\mu(L_0)}, \quad (8)$$

$$S(x) = L_0 + \Delta S(x) = L_0 - \frac{\int_{L_0}^{L_0+x} \mu(l) dl}{\mu(L_0+x)}. \quad (9)$$

Найдем математическое ожидание и корреляционную функцию случайной величины $S(x)$, определяемой соотношением (9). Математическое ожидание $S(x)$ будет иметь вид

$$E(S(x)) = L_0 + E(\Delta S(x)). \quad (10)$$

Воспользовавшись тем, что $\bar{\mu}^2(l) \underset{L_0+x}{=} 0$ ($\bar{\mu}^2$), получим

$$\begin{aligned} E(\Delta S(x)) &= E\left[-\frac{\int_{L_0+x}^{\bar{\mu}^2(l)} \bar{\mu}(l) dl}{\bar{\mu}(L_0+x)}\right] = \\ &= E\left\{\frac{-\int_{L_0+x}^{\bar{\mu}^2(l)} \bar{\mu}(l) dl}{\bar{\mu} + \bar{\mu}(L_0+x)} \cdot \frac{\bar{\mu} - \bar{\mu}(L_0+x)}{\bar{\mu} - \bar{\mu}(L_0+x)}\right\} \approx \frac{1}{\bar{\mu}^2} E\left\{\left[\bar{\mu}(L_0+x) - \bar{\mu}\right] \int_x^{L_0+x} \bar{\mu}(l) dl\right\} = \\ &= \frac{1}{\bar{\mu}^2} \int_x^{L_0+x} R_{\mu}(L_0+x, l) dl, \end{aligned}$$

где $R_{\mu}(x_1, x_2)$ - корреляционная функция $\mu(l)$. Окончательно для $E(S(x))$ будем иметь

$$E(S(x)) = L_0 + \frac{1}{\bar{\mu}^2} \int_x^{L_0+x} R_{\mu}(L_0+x, l) dl. \quad (11)$$

Корреляционная функция $S(x)$ определяется соотношением

$$\begin{aligned} R_S(l_1, l_2) &= E\{[S(l_1) - E(S(l_1))][S(l_2) - E(S(l_2))]\} = \\ &= E[\Delta S(l_1) \Delta S(l_2)] - E(\Delta S(l_1)) E(\Delta S(l_2)). \end{aligned}$$

Учитывая, что $\bar{\mu}^2$ значительно меньше $\bar{\mu}^2$, получим

$$\begin{aligned} R_S(l_1, l_2) &= E\left\{\left[\frac{1}{\bar{\mu}^2} (\bar{\mu}(L_0+l_1) - \bar{\mu}) \int_{l_1}^{L_0+l_1} \bar{\mu}(l) dl - \frac{1}{\bar{\mu}^2} \int_{l_1}^{L_0+l_1} R_{\mu}(L_0+l_1, l) dl\right] \times \right. \\ &\times \left. \left[\frac{1}{\bar{\mu}^2} (\bar{\mu}(L_0+l_2) - \bar{\mu}) \int_{l_2}^{L_0+l_2} \bar{\mu}(l) dl - \frac{1}{\bar{\mu}^2} \int_{l_2}^{L_0+l_2} R_{\mu}(L_0+l_2, l) dl\right]\right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Воспользовавшись выражением для четвертичного момента многомерной нормальной функции /5/, в результате преобразований будем иметь

$$\begin{aligned}
R_S(l_1, l_2) = & \frac{1}{\bar{\mu}^4} \int_{l_1}^{l_0+l_1} \int_{l_2}^{l_0+l_2} [R_{\mu}(l_0+l_1, l_0+l_2) R_{\mu}(l, \tau) + R_{\mu}(l_0+l_1, l) R_{\mu}(l_0+l_2, \tau) + \\
& + R_{\mu}(l_0+l_1, \tau) R_{\mu}(l_0+l_2, l)] dl d\tau + \frac{1}{\bar{\mu}^2} \int_{l_1}^{l_0+l_1} \int_{l_2}^{l_0+l_2} R_{\mu}(l, \tau) dl d\tau - \\
& - \frac{1}{\bar{\mu}^4} \int_{l_1}^{l_0+l_1} R_{\mu}(l_0+l_1, l) dl \int_{l_2}^{l_0+l_2} R_{\mu}(l_0+l_2, l) dl. \quad (I3)
\end{aligned}$$

Таким образом, получена зависимость корреляционной функции МОД от структуры показателя ослабления для общего вида корреляционной функции $\mu(l)$.

Для случая, когда $\mu(l)$ является стационарной функцией, выражение для корреляционной функции МОД заметно упрощается. После преобразования двумерных интегралов в одномерные при стационарной функции $\mu(l)$ $R_S(l_1, l_2)$ примет вид

$$\begin{aligned}
R_S(\Delta l) = & \frac{1}{\bar{\mu}^4} \left\{ \int_0^{l_0+\Delta l} (L_0+\Delta l-\tau) R_{\mu}(\tau) d\tau + \int_0^{l_0-\Delta l} (L_0-\Delta l-\tau) R_{\mu}(\tau) d\tau + \right. \\
& \left. + 2 \int_0^{\Delta l} (\tau-\Delta l) R_{\mu}(\tau) d\tau \right\} [R_{\mu}(\Delta l) + \bar{\mu}^2] + \int_0^{l_0} R_{\mu}(l_0-\Delta l-\tau) d\tau \int_{\tau}^{l_0} R_{\mu}(l_0+\Delta l-\tau) d\tau, \quad (I4)
\end{aligned}$$

где $\Delta l = l_1 - l_2$.

Очевидно, здесь $R_S(l_1, l_2) = R_S(\Delta l)$, т.е. функция $S(l)$ является стационарной.

В соответствии с (I4) выражение для дисперсии МОД будет иметь вид

$$D_S = \frac{1}{\bar{\mu}^4} \left\{ 2 \int_0^{l_0} (L_0-\tau) R_{\mu}(\tau) d\tau [D_{\mu} + \bar{\mu}^2] + \left[\int_0^{l_0} R_{\mu}(\tau) d\tau \right]^2 \right\}. \quad (I5)$$

В частном случае, когда корреляционная функция $\mu(l)$ определяется соотношением

$$R_M(\tau) = D_M e^{-\alpha|\tau|}, \quad (16)$$

для математического ожидания МОД будем иметь

$$E_S = L_0 + \frac{1}{\mu^2} \frac{D_M}{L} (1 - e^{-\alpha L_0}). \quad (17)$$

Корреляционная функция и дисперсия S в этом случае будут иметь вид

$$R_S(l) = \frac{1}{\mu^4} \left\{ \frac{D_M}{L} \left[2L_0 + \frac{1}{L} (e^{-\alpha(L_0+l)} + e^{-\alpha(L_0-l)} - 2e^{-\alpha l}) - 2l \right] \times \right. \\ \times \left[D_M e^{-\alpha l} + \mu^2 \right] + \frac{D_M^2}{L^2} \left[2e^{-\alpha l} - 2e^{-\alpha(L_0+l)} - e^{-\alpha L_0} + e^{-2\alpha L_0} - e^{-2\alpha l} + \right. \\ \left. \left. + e^{-\alpha(L_0+2l)} \right] \right\} \quad \text{при} \quad 0 \leq l \leq L_0, \quad (18)$$

$$R_S(l) = \frac{1}{\mu^4} \left\{ \frac{D_M}{L^2} \left[e^{-\alpha(L_0+l)} + e^{-\alpha(L_0-l)} - 2e^{-\alpha l} \right] \left[D_M e^{-\alpha l} + \mu^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{D_M^2}{L^2} \left[e^{-\alpha(L_0-2l)} - e^{-2\alpha l} - e^{-\alpha(L_0-3l)} + e^{-3\alpha l} \right] \right\} \quad \text{при} \quad l \geq L_0, \quad (19)$$

$$D_S = \frac{1}{\mu^4} \left\{ \frac{2\mu^2 D_M}{L} \left(L_0 + \frac{1}{L} e^{-\alpha L_0} - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{D_M^2}{L^2} (2\alpha L_0 + e^{-2\alpha L_0} - 1) \right\}. \quad (20)$$

Важно отметить, что в отличие от операций линейного осреднения полученные характеристики видимости (корреляционная функция и дисперсия) нелинейно зависят от $R_M(\tau)$.

Сопоставим результаты для реальной изменчивости МОД с характеристиками изменчивости МОД, получаемыми на основании точечных или базисных измерений показателя ослабления.

Используя предположение (I4) для случая точечных наблюдений, будем иметь

$$E(S(x)) = E(-\ln \varepsilon / \mu(x)) \approx -\ln \varepsilon / \bar{\mu}, \quad (21)$$

$$R_s(x_1, x_2) = E\{[S(x_1) - E_s][S(x_2) - E_s]\} = E[S(x_1)S(x_2)] - E_s^2,$$

$$E[S(x_1)S(x_2)] = \ln^2 \varepsilon E\left[\frac{1}{\mu(x_1)\mu(x_2)}\right] = \frac{\ln^2 \varepsilon}{\bar{\mu}^4} E\{[\bar{\mu} - \mu(x_1)][\bar{\mu} - \mu(x_2)]\} =$$

$$= \frac{\ln^2 \varepsilon}{\bar{\mu}^4} [\bar{\mu}^2 + R_\mu(x_1, x_2)],$$

$$R_s(x_1, x_2) = \frac{\ln^2 \varepsilon}{\bar{\mu}^4} R_\mu(x_1, x_2). \quad (22)$$

Очевидно, в первом приближении при сделанных допущениях математическое ожидание S при точечных измерениях определяется по формуле Кошидера для математического ожидания показателя ослабления, а нормированная корреляционная функция для S совпадает с аналогичной функцией для μ .

При базисных измерениях показатель ослабления $\mu'(l)$ является результатом осреднения показателя ослабления $\mu(l)$ по базе прибора (L) и определяется выражением

$$\mu'(x) = \frac{1}{L} \int_x^{L+x} \mu(l) dl. \quad (23)$$

Его математическое ожидание $E_{\mu'}(x)$ совпадает с математическим ожиданием $\mu(x)$, а корреляционная функция имеет вид

$$R_{\mu'}(x_1, x_2) = \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{L+x_1} \int_{x_2}^{L+x_2} R_\mu(l_1, \tau) dl_1 d\tau. \quad (24)$$

Для случая, когда корреляционная функция $\mu(l)$ определяется выражением (I6), получим

$$R_{\mu'}(\tau) = \frac{1}{L^2} \left\{ \frac{D_\mu}{L} \left[2L + \frac{1}{L} (e^{-L(L+\tau)} + e^{-L(L-\tau)} - 2e^{-L\tau}) - 2\tau \right] \right\}, \quad (25)$$

$$0 \leq \tau \leq L$$

$$R_{\mu'}(\tau) = \frac{1}{L^2} \left\{ \frac{D_{\mu}}{L^2} (e^{-\lambda(L+\tau)} + e^{\lambda(L-\tau)} - 2e^{-\lambda\tau}) \right\} \quad (26)$$

$\tau > L$

Подставив выражения для $R_{\mu'}(\tau)$ в (22), получим соотношение для дисперсии и корреляционной функции при базисных наблюдениях.

По полученным выражениям для указанных трех подходов к определению МОД (реальное значение и значения, получаемые по результатам точечных и базовых измерений) были произведены расчеты математических ожиданий E_s , коэффициентов вариации V_s (отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию, взятое в процентах), нормированных корреляционных функций $R_s(\tau)$, интервалов корреляции τ_s (расстояние, на котором корреляционная функция убывает в e раз). Расчеты производились для корреляционной функции $\mu(l)$ вида (16) при различных значениях математического ожидания E_{μ} , дисперсии D_{μ} , интервала корреляции $\tau_{\mu}(\tau_{\mu} = 1/\lambda)$.

Следует отметить, что полученные выше решения тем точнее, чем меньше в (4) вариации $\mu(l)$ по отношению к $\bar{\mu}$. Наибольшее отклонение получаемых оценок от точных решений имеет место для точечных измерений, поскольку здесь указанные относительные вариации являются большими, чем в двух других случаях (поскольку при базовых измерениях и особенно при определении реальной МОД в общем случае имеет место уменьшение вариаций за счет осреднения). Для точечных измерений несложно получить точные выражения для E_s и D_s :

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} S g(S) dS, \quad (27)$$

$$D_s = \int_{-\infty}^{\infty} (S - E_s)^2 g(S) dS, \quad (28)$$

где $g(S) = -f(\psi(S))\psi'(S)$; $\psi(S) = -\ln \varepsilon/S$; $\psi'(S) = \ln \varepsilon/S^2$;

$f(x)$ — плотность распределения случайной величины μ (а также для базовых измерений — для нормальной функции $\mu(l)$). Эти выражения могут быть использованы для оценки точности используемых приближений.

На рис. I для корреляционной функции $R_{\mu}(\tau)$ вида (16) представлены зависимости относительных изменений E_s от коэффициента вариации для точечных и базисных измерений (расчеты произведены

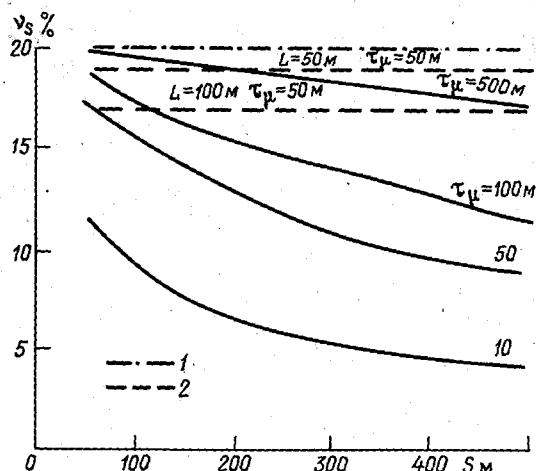


Рис.3. Зависимость коэффициента вариации МОД (v_s) от значений МОД (S).

Усл. обозначения см. рис.1.

$v_{\mu} = 15\%$ практически равны нулю. Для реальной МОД погрешности обусловленные предположением (4), будут существенно ниже.

На рис.3 приведена зависимость коэффициента вариации v_s величины МОД (коэффициент вариации v_{μ} брался равным 20%) для реальной МОД. С ростом S происходит резкое уменьшение v_s . Однако, что при всех τ_μ коэффициент вариации v_s существенно меньше, чем v_{μ} . Причем чем меньше интервал корреляции τ_μ , тем меньше v_s . Особенно сильно это уменьшение v_s происходит при значениях τ_μ меньших, чем S . Здесь же на графике приведены значения v_s для точечных и базисных измерений. Коэффициент вариации v_s в этих случаях от значения S не зависит. Из анализа рис.3 следует, что базисные и тем более точечные измерения существенно завышают коэффициент вариации МОД. Только при значениях S , близких к величине базы v_s реальной МОД и v_s , измерения прибором МОД, близки. Однако следует помнить, что существуют базисные средства имеют диапазон измерения S , начинающийся

$S = 2L$. При $\gamma_{\mu} = 20\%$ для точечных измерений $\gamma_s = 20\%$, для базисных при $\tau_{\mu} = 50$ м $\gamma_s = 19\%$ для $L = 50$ м и $\gamma_s = 16...17\%$ для $L = 100$ м. Для реальной S при тех же параметрах функции $\mu(l)$ γ_s будет составлять от 16% (при $S = 50$ м) до 6% (при $S = 500$ м).

Как показывают расчеты, для реальной МОД интервал корреляции τ_s от γ_{μ} практически не зависит, а определяется в основном значением S . Чем больше S , тем больше τ_s , имеющее порядок величины S . На рис.4 приведены зависимости интервала корреляции τ_s от S для случаев точечных и базисных измерений, и для реальной МОД. Как видно, при $L < S$ приборные измерения будут существенно занижать интервал корреляции. Так, при $S = 300$ м и $\tau_{\mu} = 50$ м для точечных измерений $\tau_s = 50$ м, для базисных измерений с базой 50 м $\tau_s = 70$ м, с базой 100 м $\tau_s = 100$ м, а истинная МОД будет иметь интервал корреляции свыше 200 м. При больших S эти расхождения будут еще значительнее.

На рис.5 представлены зависимости γ_s от интервала корреляции τ_{μ} при $\gamma_{\mu} = 20\%$. Видно, что при τ_{μ} , сравнимом и тем более превышающем S , погрешности определения γ_s приборными средствами уменьшаются. По мере уменьшения τ_{μ} погрешность определения γ_s точечными методами увеличивается, а базисными — тоже увеличивается, но не так резко.

На рис.6 представлена зависимость τ_s от интервала корреляции τ_{μ} при различных значениях S . Видно, что наибольшие погрешности определения интервала корреляции приборными методами наблюдаются при самых малых значениях τ_{μ} . В этом случае в зависимости от S погрешности определения τ_s могут достигать величин порядка 400% при $S = 500$ м. При измерениях на базах, близких к значениям S , погрешности определения τ_s уменьшаются, однако, как отмечено выше, диапазон существующих средств измерения S ограничен снизу значением $S = 2L$.

На рис.7 изображены нормированные корреляционные функции для S , полученные на основании точечных и базисных наблюдений, а также для реальной МОД для $S = 200$ м и $S = 300$ м. Расчеты произведены для случая, когда интервал корреляции $\tau_{\mu} = 50$ м. Данные зависимости качественно иллюстрируют те результаты, о которых говорилось выше. Отчетливо прослеживается занижение корреляционной функции S при точечных и базисных измерениях показателя ослабления, особенно с ростом S .

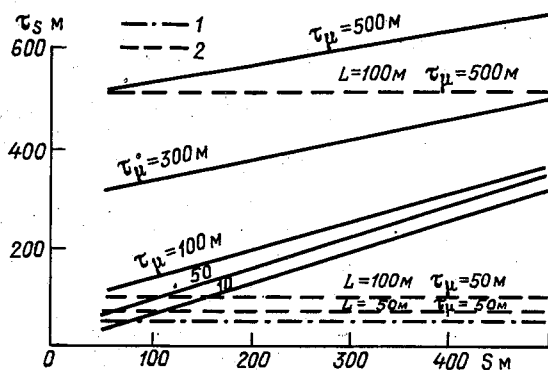


Рис.4. Зависимость интервала корреляции МОД (τ_s) от значений МОД (S).

Усл. обозначения см. рис.1.

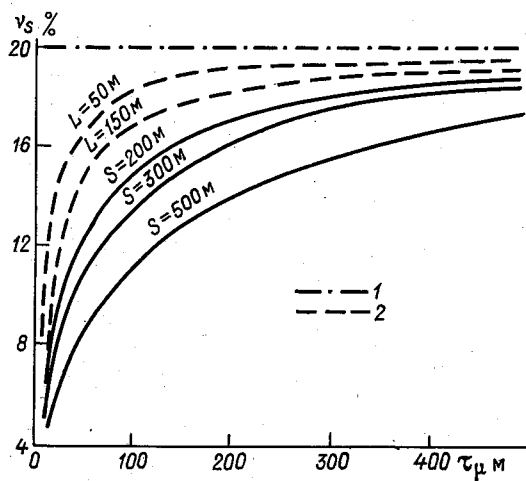


Рис.5. Зависимость коэффициента вариации МОД (v_s) от интервала корреляции показателя ослабления (τ_μ).

Усл. обозначения см. рис.1.

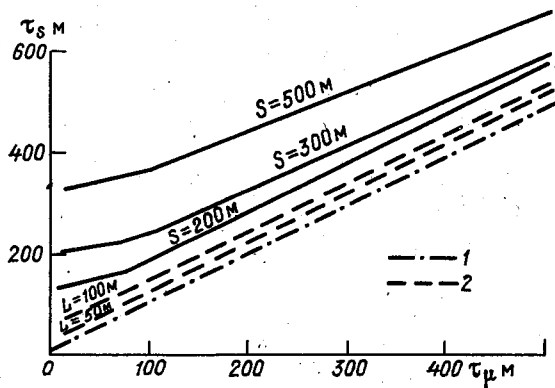


Рис.6. Зависимость интервала корреляции МОД (τ_s) от интервала корреляции показателя ослабления (τ_μ).
Усл. обозначения см. рис.1.

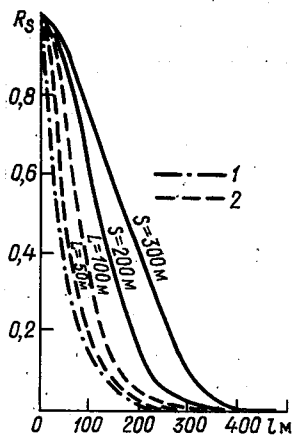


Рис.7. Нормированная пространственная корреляционная функция МОД (R_s).
Усл. обозначения см. рис.1.

Заключение

В данной работе получены аналитические связи характеристик пространственной структуры поля МОД и поля ослабления.

Приведенные результаты позволяют оценить методические погрешности, возникающие при определении характеристик дальности видимости по результатам приборных измерений показателя ослабления.

Получаемые по результатам измерений (точечных и базисных) характеристики изменчивости значительно превышают реальную изменчивость МОД, которая в действительности значительно меньше общепринятой.

Список литературы

1. Атмосферная оптика. ОСТ 52.04.9-82. - Л.: Гидрометеоздат, 1984. - 23 с.
2. Горышин В.И., Корниенко В.И. О репрезентативности измерений метеорологической дальности видимости фотометрами с малой измерительной базой // Труды ГГО. - 1972. - Вып.279. - С.80-84.
3. Горышин В.И. О точности измерения дальности видимости с помощью регистраторов прозрачности атмосферы // Труды ГГО. - 1978. - Вып.406. - С.30-37.
4. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. - М.: Мир, 1979. - 421 с.
5. Пугачев В.С. Теория случайных функций. - М.: Физматгиз, 1960. - 883 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОДИНОЧНОГО ОГНЯ В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

При обеспечении взлета и посадки воздушного судна одной из важнейших метеорологических характеристик является дальность видимости на взлетно-посадочной полосе /6/, которая в большинстве случаев является дальностью видимости огней высокой интенсивности (ДВ ОВИ). Имеются работы, которые посвящены вопросам определения ДВ ОВИ при посадке самолета /2-4/. Вместе с тем вопросы изменчивости ДВ ОВИ и пространственной структуры поля ДВ ОВИ практически не освещены, хотя, исходя именно из характеристик поля ДВ ОВИ, необходимо формулировать требования к аэродромным измерительным системам. Очевидно, сложилось представление, что структура поля ДВ ОВИ идентична структуре поля МОД.

В настоящей работе ставится задача исследования пространственной структуры ДВ ОВИ при условии оптической неоднородности атмосферы и оценки методических погрешностей определения ДВ ОВИ, вызванных допущениями о горизонтальной однородности показателя ослабления атмосферы.

Для оптически однородной атмосферы, когда показатель ослабления μ не зависит от координаты, а является постоянной величиной, сформулировано уравнение Аллара /5/, связывающее освещенность E , создаваемую на зрачке глаза точечным источником силой света I_0 , с расстоянием x , на которое удален источник света от глаза наблюдателя:

$$E(x) = I_0 e^{-\mu x} / x^2 \quad (1)$$

В соответствии с определением коэффициента пропускания для оптически неоднородной атмосферы предлагается следующая зависимость освещенности на зрачке глаза от расстояния между источником света и наблюдателем:

$$E(x) = \frac{I_0}{x^2} e^{-\int_0^x \mu(l) dl} \quad (2)$$

Тогда для определения дальности видимости одиночного огня L_0 /1/ получим

$$E_{\text{пор}} = \frac{I_0}{L_0^2} e^{-\int_0^{L_0} \mu(l) dl}, \quad (3)$$

где $E_{\text{пор}}$ — порог освещенности для точечного источника по отношению к определенному фону.

Найдем характеристики пространственной структуры поля L_0 , определяемой соотношением (3), где $\mu(l)$ рассматривается как случайная функция координаты. Нахождение точного аналитического решения уравнения (3) относительно L_0 не представляется возможным. Для приближенного решения используется предположение, что функция $\mu(l)$ может быть представлена в виде

$$\mu(l) = \bar{\mu} + \dot{\mu}(l) \quad (4)$$

и при этом $\dot{\mu}^2(l) = O(\bar{\mu}^2)$.

Решение (3) для L_0 ищется в виде

$$L_0 = \bar{L}_0 + \Delta L_0, \quad (5)$$

где $\bar{L}_0$ — решение уравнения (3) для случая, когда $\mu(l) = \bar{\mu}$. Запишем выражение (3) в виде

$$\ln(E_{\text{пор}}/I_0) = -2 \ln L_0 - \int_0^{L_0} \mu(l) dl. \quad (6)$$

Воспользовавшись соотношениями (4) и (5), будем иметь

$$\begin{aligned} \ln(E_{\text{пор}}/I_0) = & -2 \ln(1 + \Delta L_0/\bar{L}_0) - 2 \ln \bar{L}_0 - \\ & - \bar{\mu} \bar{L}_0 - \bar{\mu} \Delta L_0 - \int_0^{\Delta L_0} \dot{\mu}(l) dl. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что $\bar{L}_0$ является решением (3) для случая, когда $\mu(l) = \bar{\mu}$, выражение (7) примет вид

$$2 \ln(1 + \Delta L_0/\bar{L}_0) + \bar{\mu} \Delta L_0 + \int_0^{\Delta L_0} \dot{\mu}(l) dl = 0. \quad (8)$$

Разложив первое и последнее слагаемые в (8) в ряд Тейлора и взяв в обоих случаях с учетом малости $\dot{\mu}(l)$ только первые два члена разложения, получим

$$\int_0^{\bar{L}_0} \dot{\mu}(\ell) d\ell + \bar{\mu} \Delta L_0 + \dot{\mu}(\bar{L}_0) \Delta L_0 + 2 \frac{\Delta L_0}{\bar{L}_0} = 0. \quad (9)$$

Решением уравнения (9) будет выражение

$$\Delta L_0(x) = - \frac{\int_0^{\bar{L}_0+x} \dot{\mu}(\ell) d\ell}{\dot{\mu}(\bar{L}_0+x) + \bar{\mu} + 2/\bar{L}_0}, \quad (10)$$

а в соответствии с (5) L_0 будет равно

$$L_0(x) = \bar{L}_0 + \Delta L_0(x) = \bar{L}_0 - \frac{\int_0^{\bar{L}_0+x} \dot{\mu}(\ell) d\ell}{\dot{\mu}(\bar{L}_0+x) + \bar{\mu} + 2/\bar{L}_0}. \quad (11)$$

Найдем математическое ожидание и корреляционную функцию случайной величины $L_0(x)$, определяемой соотношением (11). Проведем преобразования, которые были проделаны в (7) при нахождении характеристик структуры метеорологической оптической дальности (МОД), получим:

$$E(L_0(x)) = \frac{1}{(\bar{\mu} + 2/\bar{L}_0)^2} \int_0^{\bar{L}_0+x} R_{\mu}(\bar{L}_0 + x_1, \ell) d\ell + \bar{L}_0, \quad (12)$$

$$R_{L_0}(x_1, x_2) = E\{[L_0(x_1) - E(L_0(x_1))][L_0(x_2) - E(L_0(x_2))]\} =$$

$$= E\{[\Delta L_0(x_1) - E(\Delta L_0(x_1))][\Delta L_0(x_2) - E(\Delta L_0(x_2))]\} =$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{\bar{L}_0})^4} \int_{x_1}^{\bar{L}_0+x_1} \int_{x_2}^{\bar{L}_0+x_2} [R_{\mu}(\bar{L}_0+x_1, \bar{L}_0+x_2) R_{\mu}(\ell_1, \tau) + R_{\mu}(\bar{L}_0+x_1, \ell) R_{\mu}(\bar{L}_0+x_2, \tau) + \\ &+ R_{\mu}(\bar{L}_0+x_1, \tau) R_{\mu}(\bar{L}_0+x_2, \ell)] d\ell d\tau + \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{\bar{L}_0})^2} \int_{x_1}^{\bar{L}_0+x_1} \int_{x_2}^{\bar{L}_0+x_2} R_{\mu}(\ell_1, \tau) d\ell d\tau - \\ &- \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{\bar{L}_0})^4} \int_{x_1}^{\bar{L}_0+x_1} R_{\mu}(\bar{L}_0+x_1, \ell) d\ell \int_{x_2}^{\bar{L}_0+x_2} R_{\mu}(\bar{L}_0+x_2, \ell) d\ell. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, получена зависимость корреляционной функции L_c от структуры показателя ослабления для общего вида корреляционной функции $\mu(\ell)$.

Для случая, когда $\mu(\ell)$ является стационарной функцией, выражение для корреляционной функции L_c заметно упрощается. После преобразования двумерных интегралов к одномерным $R_{L_c}(x_1, x_2)$ при стационарной функции $\mu(\ell)$ примет вид

$$R_{L_c}(\Delta\ell) = \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^4} \left\{ \int_0^{\bar{L}_c + \Delta\ell} (\bar{L}_c + \Delta\ell - \tau) R_\mu(\tau) d\tau + \int_0^{\bar{L}_c - \Delta\ell} (\bar{L}_c - \Delta\ell - \tau) R_\mu(\tau) d\tau + \right. \\ \left. + 2 \int_0^{\Delta\ell} (\tau - \Delta\ell) R_\mu(\tau) d\tau \right\} [R_\mu(\Delta\ell) + (\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^2] + \int_0^{\bar{L}_c} R_\mu(\bar{L}_c - \Delta\ell - \tau) d\tau \int_0^{\bar{L}_c} R_\mu(\bar{L}_c + \Delta\ell - \tau) d\tau \}, \quad (I4)$$

где $\Delta\ell = x_1 - x_2$. Очевидно, здесь $R_{L_c}(x_1, x_2) = R_{L_c}(\Delta\ell)$, т.е. функция $L_c(x)$ является стационарной. В соответствии с (I4) выражение для дисперсии L_c будет иметь вид

$$D_{L_c} = \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^4} \left\{ 2 \int_0^{\bar{L}_c} (\bar{L}_c - \tau) R_\mu(\tau) d\tau \left[D_\mu + (\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^2 \right] + \left[\int_0^{\bar{L}_c} R_\mu(\tau) d\tau \right]^2 \right\}. \quad (I5)$$

В частном случае, когда корреляционная функция $\mu(\ell)$ определяется соотношением

$$R_\mu(\tau) = D_\mu e^{-\lambda|\tau|}, \quad (I6)$$

для математического ожидания L_c будем иметь

$$E(L_c) = \bar{L}_c + \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^2} \frac{D_\mu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \bar{L}_c}). \quad (I7)$$

Корреляционная функция и дисперсия L_c в этом случае имеют вид:

$$R_{L_c}(\ell) = \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^4} \left\{ \frac{D_\mu}{\lambda} \left[2\bar{L}_c + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda(\bar{L}_c + \ell)} + e^{-\lambda(\bar{L}_c - \ell)} - 2e^{-\lambda\ell}) - 2\ell \right] \times \right. \\ \left. \text{при } 0 \leq \ell \leq \bar{L}_c \right. \\ \left. \times \left[D_\mu e^{-\lambda\ell} + (\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^2 \right] + \frac{D_\mu^2}{\lambda^2} \left[2e^{-\lambda\ell} - 2e^{-\lambda(\bar{L}_c + \ell)} - e^{-\lambda\bar{L}_c} + e^{-\lambda\bar{L}_c} - 2e^{-\lambda\ell} - e^{-\lambda(\bar{L}_c + 2\ell)} \right] \right\}, \quad (I8)$$

$$R_{L_c}(l) = \frac{1}{(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c})^4} \left\{ \frac{D_{\mu}}{L_c^2} \left[e^{-\lambda(\bar{L}_c + l)} + e^{\lambda(\bar{L}_c - l)} - 2e^{-\lambda l} \right] \left[D_{\mu} e^{-\lambda l} + \left(\bar{\mu} + \frac{2}{L_c} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{D_{\mu}}{L_c^2} \left[e^{\lambda(\bar{L}_c - 2l)} - e^{-2\lambda l} - e^{\lambda(\bar{L}_c - 3l)} + e^{-3\lambda l} \right] \right\} \quad (19)$$

Важно отметить, что в отличие от операций линейного осреднения полученные характеристики L_c (корреляционная функция и дисперсия), как и характеристики МОД /7/, нелинейно зависят от $R_{\mu}(\tau)$.

Сопоставим результаты для реальной изменчивости L_c с характеристиками изменчивости L_c , получаемыми на основании точечных или базисных измерений показателя ослабления в предположении оптической однородности атмосферы. В этом случае закон Аллара принимает вид

$$E_{\text{пор}} = \frac{I_0}{L_c^2} e^{-\mu L_c}, \quad (20)$$

где μ — результат измерения.

Найдем зависимость дисперсии случайной величины L_c от параметров распределения случайной величины μ . Для этого продифференцируем по μ обе части выражения (20):

$$\frac{d}{d\mu} \left(\frac{E_{\text{пор}}}{I_0} \right) = \frac{d}{d\mu} \left(\frac{e^{-\mu L_c}}{L_c^2} \right), \\ 0 = L_c^2 + \mu L_c \frac{dL_c}{d\mu} + 2 \frac{dL_c}{d\mu},$$

$$\frac{dL_c}{d\mu} = - \frac{L_c \mu}{\mu L_c + 2} \frac{d\mu}{d\mu}$$

и, переходя от дифференциалов к приращениям величин, получим

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} \approx - \frac{L_c \mu}{\mu L_c + 2} \frac{\Delta \mu}{\mu} \quad (21)$$

Взяв среднее квадратическое отклонение обеих частей (21), получим выражение для коэффициента вариации L_c (отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию)

$$\gamma_{L_c} = \frac{L_c \mu}{\mu L_c + 2} \gamma_{\mu}, \quad (22)$$

где γ_{L_c} , γ_{μ} — коэффициенты вариации L_c и μ соответственно. Выражение для корреляционной функции L_c , где L_c определяется выражением (20), в общем случае может быть найдено при использовании предположений (4) и (5). В этом случае получается выражение для L_c , аналогичное (9):

$$2 \Delta L_c / \bar{L}_c - \dot{\mu} \bar{L}_c - \dot{\mu} \Delta L_c - \bar{\mu} \Delta L_c = 0. \quad (23)$$

Отсюда

$$\Delta L_c = - \frac{\dot{\mu} \bar{L}_c}{2 / \bar{L}_c + \bar{\mu} + \dot{\mu}}, \quad (24)$$

$$L_c = \bar{L}_c + \Delta L_c = \bar{L}_c \left(1 - \frac{\dot{\mu}}{2 / \bar{L}_c + \bar{\mu} + \dot{\mu}} \right). \quad (25)$$

Математическое ожидание и корреляционная функция L_c будут определяться соотношениями

$$\begin{aligned} E(L_c(x)) &= \bar{L}_c E \left[1 - \frac{\dot{\mu}(\bar{L}_c + x)}{2 / \bar{L}_c + \bar{\mu} + \dot{\mu}(x + \bar{L}_c)} \cdot \frac{2 / \bar{L}_c + \bar{\mu} - \dot{\mu}(\bar{L}_c + x)}{2 / \bar{L}_c + \bar{\mu} - \dot{\mu}(\bar{L}_c + x)} \right] = \\ &= \bar{L}_c E \left[1 + \frac{\dot{\mu}^2(\bar{L}_c + x)}{(2 / \bar{L}_c + \bar{\mu})^2} \right] = \bar{L}_c \left[1 + \frac{D_{\mu}(\bar{L}_c + x)}{(2 / \bar{L}_c + \bar{\mu})^2} \right] \approx \bar{L}_c, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} R_{L_c}(x_1, x_2) &= E \left\{ [L_c(x_1) - E(L_c(x_1))] [L_c(x_2) - E(L_c(x_2))] \right\} = \\ &= \frac{\bar{L}_c^2}{(2 / \bar{L}_c + \bar{\mu})^4} \left[(2 / \bar{L}_c + \bar{\mu})^2 R_{\mu}(\bar{L}_c + x_1, \bar{L}_c + x_2) + 2 R_{\mu}^2(\bar{L}_c + x_1, \bar{L}_c + x_2) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Очевидно, в первом приближении при сделанных допущениях математическое ожидание L_c , полученного по результатам измерений

показателя ослабления, определяется по формуле Аллара для оптически однородной атмосферы при показателе ослабления, равном своему математическому ожиданию.

При базисных измерениях показатель ослабления $\mu'(l)$ является результатом осреднения показателя ослабления $\mu(l)$ по базе прибора (L) и определяется выражением

$$\mu'(l) = \frac{1}{L} \int_l^{L+l} \mu(x) dx \quad (28)$$

Его математическое ожидание $E_{\mu'}(x)$ совпадает с математическим ожиданием $\mu(x)$, а корреляционная функция имеет вид

$$R_{\mu'}(x_1, x_2) = \frac{1}{L^2} \int_{x_1}^{L+x_1} \int_{x_2}^{L+x_2} R_{\mu}(l, \tau) dl d\tau \quad (29)$$

Используя выражения для корреляционной функции $\mu'(x)$ для случая, когда $R_{\mu}(x)$ определяется выражением (16), приведенные в /7/, и формулу (27), будем иметь выражение для корреляционной функции L_0 для случая базисных наблюдений.

По полученным выражениям для указанных трех подходов к определению L_0 (реальное значение и значения, получаемые по результатам точечных и базовых наблюдений) были произведены расчеты математических ожиданий коэффициентов вариации, нормированных корреляционных функций. Произведена оценка интервалов корреляции (расстояние, на котором корреляционная функция убывает в e раз). Расчеты проделаны для корреляционной функции $\mu(l)$ вида (16) при различных значениях математического ожидания E_{μ} , дисперсии D_{μ} , интервала корреляции τ_{μ} ($\tau_{\mu} = 1/\alpha$).

Следует отметить, что полученные выше решения тем точнее, чем меньше в (4) вариации $\mu(l)$ по отношению к $\bar{\mu}$. Наибольшее отклонение получаемых оценок от точных решений имеет место для точечных измерений, поскольку здесь указанные относительные вариации являются большими, чем в двух других случаях (при базовых измерениях и особенно при определении реальной L_0 в общем случае имеет место уменьшение вариации за счет осреднения). Поскольку для точечных и базисных измерений получены точные выражения для коэффициента вариации (22), эти оценки были использованы для оценки точности используемых приближений (4). Из сравнения результатов расчетов коэффициента вариации L_0 для случая точечных измерений по формулам (22) и (27) следует, что при коэффициенте

вариации $\mu(l)$, равном 0,25, относительные погрешности определения коэффициента вариации L_0 по формуле (27) не превышают 2-3 %.

Рассмотрим зависимость характеристик изменчивости дальности видимости огня от условий освещенности и силы света огня. На рис.1 представлена зависимость коэффициента вариации $\sqrt{L_0}$ от $\lg(E_0/I_0)$ для случая, когда коэффициент вариации $\sqrt{\mu}$ был равен 0,2. Видно, что в отличие от результатов точечных и базисных наблюдений, для которых $\sqrt{L_0}$ уменьшается с ростом освещенности и уменьшением силы света огня, для реальной L_0 коэффициент вариации хотя и незначительно, но растет. Этот рост обусловлен уменьшением L_0 . Таким образом, с ростом освещенности и ослаблением силы света огня несколько уменьшается погрешность определения L_0 по данным измерений показателя ослабления.

На рис.2 представлена зависимость интервала корреляции L_0 от условий освещенности и силы света огня. Для случая точечных измерений $\mu(l)$ интервал корреляции τ_{L_0} не зависит от условий освещенности и силы света огня, а определяется только интервалом корреляции $\mu(l)$. При базисных измерениях на τ_{L_0} влияет еще и длина измерительной базы. Для реальной L_0 зависимость τ_{L_0} от $\lg(E_0/I_0)$ существенна, обусловлена зависимостью интервала корреляции от величины L_0 . С ростом $\lg(E_0/I_0)$ происходит уменьшение L_0 , а следовательно, и уменьшение ее интервала корреляции, что, в свою очередь, приводит к уменьшению погрешности определения интервала корреляции L_0 по результатам приборных измерений $\mu(l)$.

На рис.3 приводится зависимость коэффициента вариации L_0 от величины L_0 при $\sqrt{\mu} = 0,2$. Как и для МОД /7/, коэффициент вариации L_0 существенно меньше $\sqrt{\mu}$. Причем эта разница возрастает с уменьшением τ_{μ} . Для точечных и базисных измерений $\mu(l)$ с ростом L_0 уменьшение $\sqrt{L_0}$ составляет доли процента, а для реальной L_0 происходит резкое уменьшение коэффициента вариации. Так, при изменении L_0 от 200 до 1000 м при $\tau_{\mu} = 50$ м $\sqrt{L_0}$ меняется от 11 до 7 %. Как видно из графика, базисные и тем более точечные измерения $\mu(l)$ существенно завышают коэффициент вариации $\sqrt{L_0}$, особенно при L_0 , больших измерительной базы прибора. Так, при $\tau_{\mu} = 50$ м и $\sqrt{\mu} = 0,2$ коэффициент вариации L_0 для точечных измерений равен примерно 17 %, для базисных о базой

Рис.1. Зависимость коэффициента вариации γ_{L_0} от $\lg \frac{E_0}{I_0}$ при $\gamma_\mu = 20\%$.
1 - точечные измерения,
2 - базисные измерения.

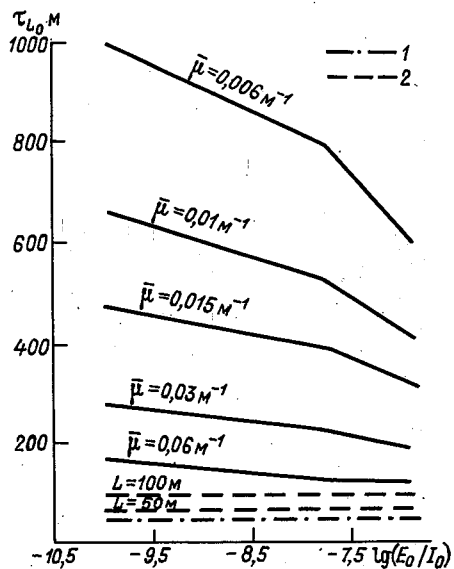
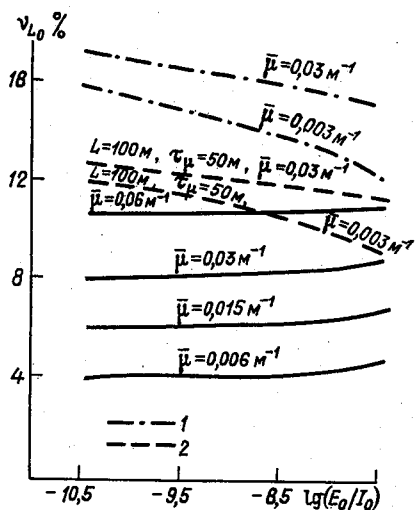


Рис.2. Зависимость интервала корреляции τ_{L_0} от $\lg \frac{E_0}{I_0}$ при $\tau_\mu = 50 \text{ м}$.
Усл. обозначения см. рис.1.

100 м - 13 %, а для реальной L_0 , как уже было отмечено, меняется от II до 7 %.

На рис.4 представлена зависимость интервала корреляции L_c от величины L_0 . Видно, что точечные и базисные наблюдения существенно занижают интервал корреляции, особенно при малых значениях τ_m , меньших L_0 . Так, при $\tau_m = 50$ м погрешность в определении L_{L_0} составляет от 100 % при $L_0 = 200$ м до 500 % при $L_0 = 500$ м, а с ростом L_0 превышает и эти значения.

На рис.5 представлены зависимости коэффициента вариации L_c от коэффициента вариации $\mu(l)$. Относительная погрешность определения ν_{L_c} по результатам точечных и базисных наблюдений остается постоянной. Коэффициент вариации L_c , получаемый по результатам измерений $\mu(l)$, всегда превышает реальный. Естественно, что при длине измерительной базы, близкой к L_0 , эти расхождения уменьшаются.

На рис.6 представлена зависимость коэффициента вариации ν_{L_c} от τ_m для $\nu_m = 0,2$. Видно, что при больших τ_m ($\tau_m \geq L_0$) погрешность определения ν_{L_c} по результатам приборных измерений уменьшается. По мере уменьшения τ_m погрешность определения ν_{L_c} точечными методами увеличивается, а базисными увеличивается, но не так резко.

На рис.7 представлена зависимость L_c от τ_m при различных значениях L_0 . Здесь максимальные погрешности определения L_{L_0} также приходятся на минимальные значения τ_m , достигая при $L_0 = 400$ м значений порядка 300 %.

В целом, говоря о погрешностях определения характеристик структуры дальности видимости одиночного огня существующими инструментальными методами, можно сказать, что, как и для случая МОД /7/, оценки характеристик изменчивости L_c по результатам измерений $\mu(l)$ существенно завышают реальные. Более того, если при измерении МОД существующие приборы имеют диапазон, начинающийся со значений МОД, равных двум длинам баз, то для измерений L_c этот диапазон начинается с больших значений (определяется условиями освещенности и силы света огня), а следовательно, и минимальные погрешности (при значениях L_c , равных нижней границе диапазона измерения) будут значительно выше, чем при измерении МОД.

На рис.8 изображены нормированные корреляционные функции для L_c для всех типов измерений и для реальной дальности видимости

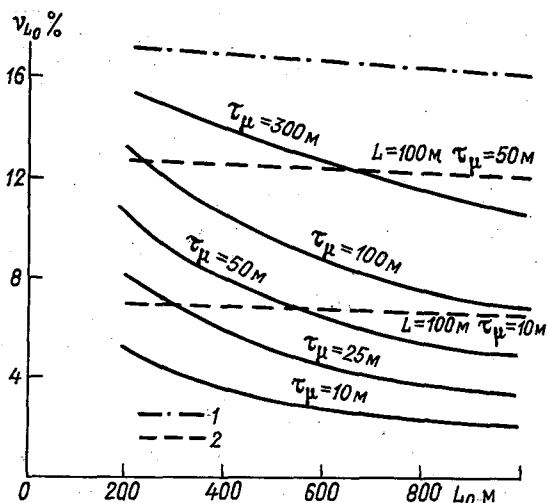


Рис.3. Зависимость коэффициента вариации v_{L_0} от значений L_0 .
Усл. обозначения см. рис.1.

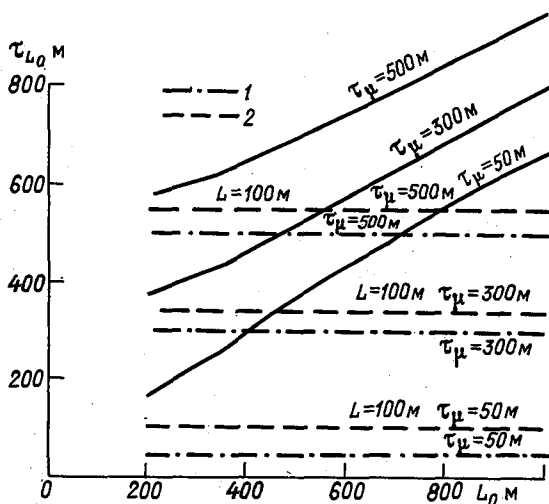


Рис.4. Зависимость интервала корреляции τ_{L_0} от значений L_0 .
Усл. обозначения см. рис.1.

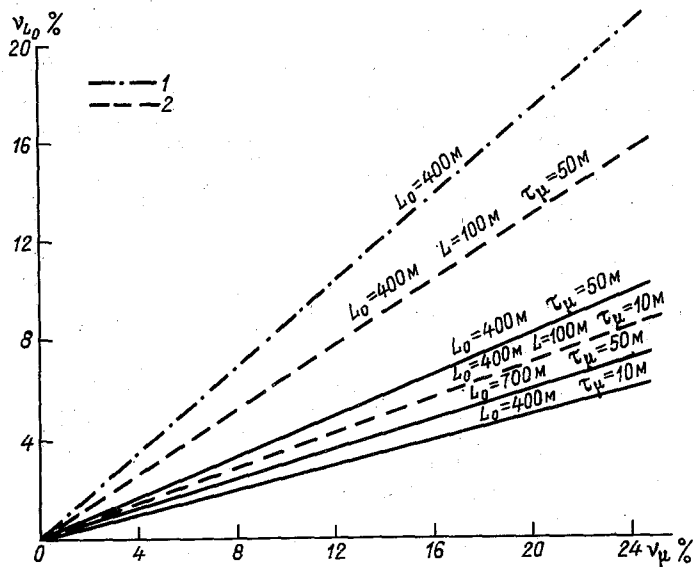


Рис.5. Зависимость коэффициента вариации v_{L_0} от v_{μ} .
Усл. обозначения см. рис.1.

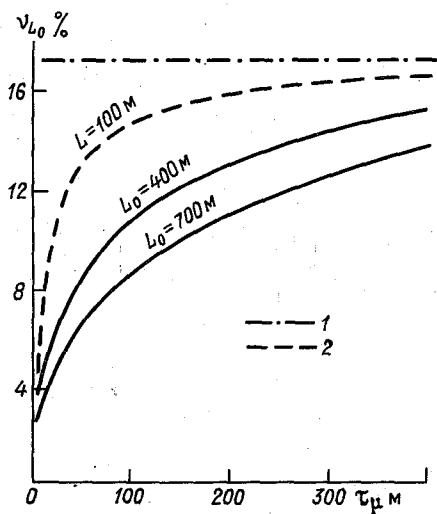


Рис.6. Зависимость ко-
эффициента вариации v_{L_0} от
 τ_{μ} .
Усл. обозначения см.
рис.1.

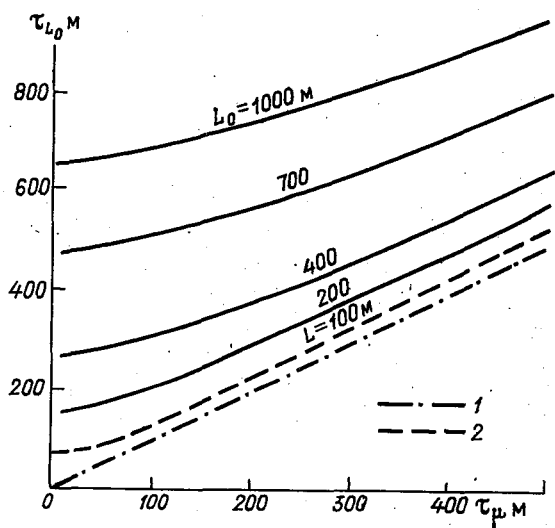


Рис.7. Зависимость интервала корреляции τ_{L_0} от τ_{μ} .
Усл. обозначения см. рис.1.

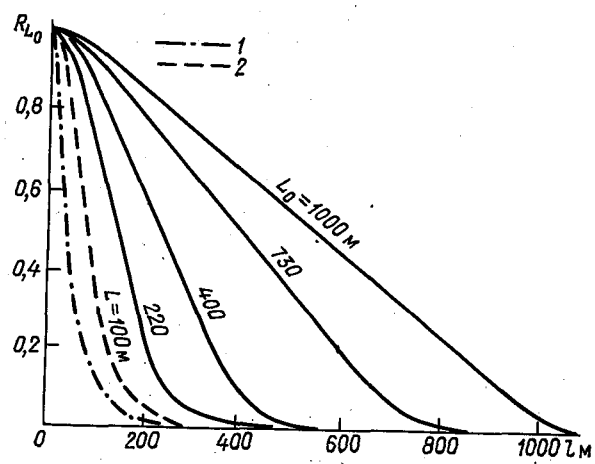


Рис.8. Нормированные пространственные корреляционные функции R_{L_0} .
Усл. обозначения см. рис.1.

огня при $L_0 = 220, 400, 700$ и 1000 м. Расчеты произведены для случая, когда $T_M = 50$ м. Отчетливо прослеживается занижение корреляционной функции L_0 при точечных и базисных измерениях, особенно при росте среднего значения L_0 .

Заключение

В работе получены аналитические связи характеристик пространственной структуры поля дальности видимости одиночного огня и поля показателя ослабления.

Получены результаты, позволяющие оценить методические погрешности, возникающие при определении характеристик видимости огня по результатам приборных измерений показателя ослабления атмосферы.

Показано, что получаемые по результатам измерений (точечных и базисных) характеристики изменчивости существенно завышают реальную изменчивость дальности видимости огня, которая в действительности значительно меньше, чем изменчивость МОД.

Список литературы

1. Атмосферная оптика. ОСТ 52.04.9-82. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 23 с.
2. Афанасьев А.А. Некоторые вопросы методики обнаружения ориентиров ВПП днем // Труды ГГО. - 1987. - Вып. 512. - С. 121-128.
3. Гаврилов В.А. Видимость в атмосфере. - Л.: Гидрометеиздат, 1966. - 323 с.
4. Горышин В.И., Ковалев В.А. Методика инструментального определения дальности видимости огней взлетно-посадочной полосы (ВПП) // Труды ГГО. - 1978. - Вып. 406. - С. 38-45.
5. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. - М.: Мир, 1979. - 421 с.
6. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации СССР (НМО ГА-82). - Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 183 с.
7. Персин С.М., Лайхтман В.И. Характеристики изменчивости поля метеорологической оптической дальности (МОД) в оптически неоднородной атмосфере // См. наст. сб.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О МЕТЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В связи с успехами в создании автоматических метеорологических станций особенно заметно отставание в разработке принципов построения первичных измерительных преобразователей, способных давать информацию о начале, окончании и интенсивности атмосферных явлений. Связано это с тем, что атмосферные явления не идентифицируются с помощью измерения какой-либо одной физической величины. Для создания сигнализаторов явлений, а также получения информации об их интенсивности требуется измерение комплекса характеристик, в том числе и сопутствующих атмосферным явлениям физических процессов, т.е. использование косвенных методов. В частности, для идентификации метелей может представлять интерес изучение электрических явлений, наблюдаемых во время метели.

Известно, что во время метелей отмечается коронирование мачт, антенн, заостренных предметов /2/. Специально произведенные измерения напряженности электрического поля показали значительное увеличение напряженности электрического поля во время метелей /5/. Однако эти сведения носят случайный, отрывочный характер, а само явление рассматривается только как источник помех при радиосвязи.

С целью систематического изучения электрических явлений во время метели в течение ряда лет нами проводились измерения электрического тока на электрод, установленный над поверхностью земли. Измерения производились в четырех пунктах, расположенных в различных климатических зонах: на побережье Каспийского моря, на двух метеостанциях Мурманской обл., а также на горной метеостанции Узбекской ССР. В Мурманской обл. и Узбекистане одновременно с измерениями электрического тока производились измерения твердого расхода с помощью метелемеров В0-2 /1/.

Электрод устанавливался на изолированной подставке на высоте 0,5 м над поверхностью земли и соединялся с измерителем тока, который имел выход на самописец (рис.1 а).

Применение самописца Н-27 с большой скоростью протяжки (более 1 мм/с) позволило проследить развитие метели. На рис.1 представлены последовательные стадии развития метели, записанной на ленте самописца Н-27. Чувствительность измерителя во всех трех представленных случаях различная: на рис.2а - чувствительность

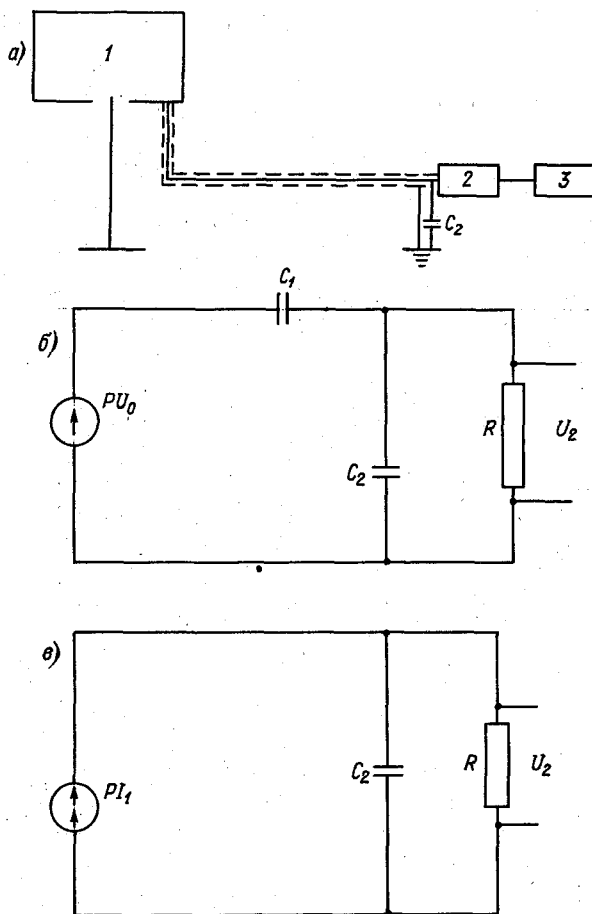


Рис. I. Электрическая схема при измерении тока во время метелей.

а) общая схема измерительного устройства: 1 - электрод, 2 - усилитель, 3 - самописец; б) эквивалентная схема генератора ЭДС; в) эквивалентная схема генератора тока.

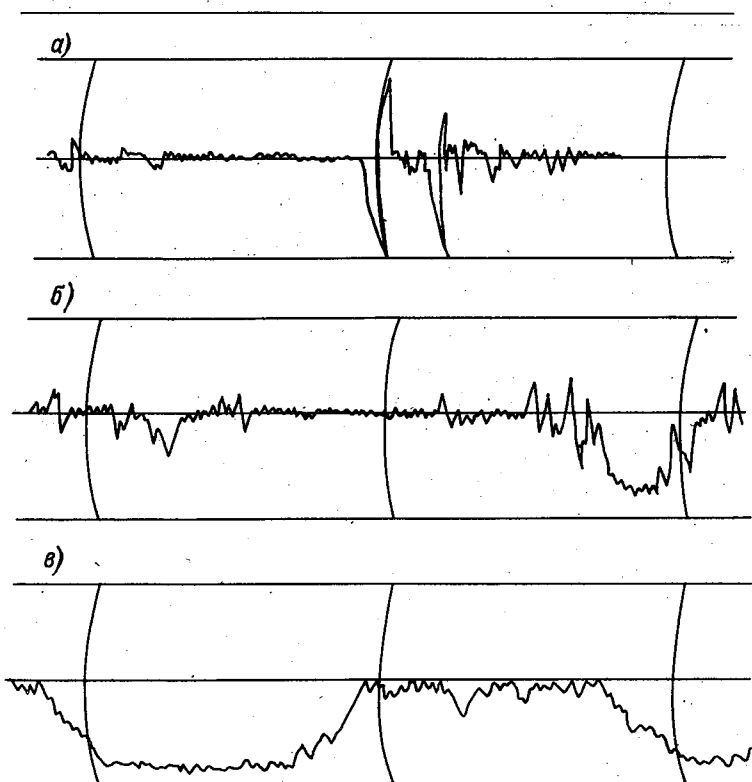


Рис.2. Пример записи, сделанной во время поземка.

а) начало поземка, б) развитие поземка, в) сильный поземок.

10^{-10} А/мм; на рис.2 б - чувствительность $2 \cdot 10^{-9}$ А/мм; на рис.2 в - чувствительность $2 \cdot 10^{-8}$ А/мм. Нуль прибора совмещен с серединой ленты самописца, размер отклонения от нулевой линии пропорционален значению тока. Дугами прочерчены временные метки, в представленных случаях отрезок между двумя метками соответствует интервалу времени в одну минуту.

Приведенные записи соответствуют следующим условиям:

рис.2 а - начало дефляции снега, скорость ветра 5 м/с, порывы до 8 м/с;

рис.2 б - слабая низовая метель, скорость ветра 8 м/с, порывы до 15 м/с;

рис.2 в - умеренная метель, скорость ветра 12 м/с, порывы до 18 м/с.

Визуальные наблюдения позволили установить, что пульсациям тока соответствует прохождение вблизи электрода отдельных порций поднятого с земли снега. Одновременная запись на ленте самописца электрического тока и скорости ветра на высоте установки электрода обнаруживает между ними хорошую корреляцию. Запись электрического тока на электрод во время метели дает возможность получить временные характеристики процессов горизонтального переноса снега, которые, как показывают наблюдения, оказываются существенно различными в горах и на равнинной местности севера европейской части СССР.

В условиях горной метеостанции продолжительность пульсаций тока в начале дефляции составляет несколько секунд, при развитой метели продолжительность периодов усиления тока одна-три минуты.

Результаты, полученные во всех сериях измерений, совпадают и могут быть объяснены в рамках теории контактной электризации тел, находящихся в потоке частиц /3, 4/. Основные закономерности изученного процесса следующие:

1. Во всех случаях в отсутствие горизонтального переноса снега ток не отмечался, т.е. в этом случае плотность электрического тока, измеренного с помощью электрода, была менее 10^{-10} А/м².

2. С началом дефляции снега или переноса выпадающих осадков ветром самописец регистрировал сигнал, среднее значение которого возрастало с увеличением интенсивности метели, причем во всех четырех сериях измерений началу дефляции соответствует плотность тока 10^{-10} А/м², а сильным метелям соответствует плотность тока порядка 10^{-6} А/м², при этом значение тока является случайной функцией времени.

3. В самом начале развития поземки, когда отмечается поднятие с земли отдельных случайных порций снега, на ленте самописца обязательно регистрируются двуполярные импульсы, которые с увеличением скорости ветра превращаются в однополярные (рис.2 а, б).

4. Знак электрического тока при метелях всегда положительный. Во время снегопадов, сопровождаемых ветром, при небольших скоростях ветра ($V > 10$ м/с) иногда наблюдались случаи отрицательных токов.

Тот факт, что при измерении электрического тока во время метелей получаются воспроизводимые результаты, позволяет надеяться, что они могут быть использованы для получения информации о метелях. Для этого необходимо количественно объяснить наблюдаемые за-

кономерности, в частности найти связь между средней величиной электрического тока и интенсивностью метели, а также выяснить причину различного вида записей электрического тока (переход от дупольных отдельных импульсов к униполярной электризации). В связи с этим ниже приводится интерпретация результатов измерения на основе современных представлений об электрических процессах, протекающих в приземном слое.

Электрическое состояние металлического тела (электрода), находящегося над поверхностью земли, определяется двумя факторами: электрическим полем, существующим в свободной атмосфере, и электрическими токами — током проводимости и конвективными токами.

При отсутствии в атмосфере конвективных токов электрод принимает через некоторое время потенциал U_0 той точки пространства, где он находится:

$$U_0 = \int_0^h E(x, t) dt, \quad (I)$$

где $E(x, t)$ — напряженность электрического поля атмосферы, h — высота расположения электрода. Принимая собственную емкость электрода равной C_1 , а параметра измерительной цепи C_2 и R , эквивалентную схему можно представить в виде генератора ЭДС с последовательно присоединенными емкостью C_1 и измерителем. Собственное активное сопротивление генератора близко к нулю, разность потенциалов U_0 представляет собой входное напряжение, выходящее напряжение U_2 измеряется на сопротивлении R . На рис. I б представлена эквивалентная схема генератора напряжения. Передаточная функция этой цепи $f(p) = U_2(x)/U_0(x)$ легко находится из уравнений Кирхгофа для генератора ЭДС, записанных в операторной форме:

$$U_c(p) = I_1(p) \left(\frac{1}{pC_1} + \frac{1}{pC_2} \right) - \frac{I_2}{pC_2}, \quad (2)$$

$$U_2(p) = I_2(p) R,$$

$$R I_2(p) = [I_1(p) - I_2(p)] \frac{1}{pC_2} = 0.$$

В системе уравнений (2) принято, что $I(p)$ — преобразование Лапласа $\mathcal{L}$ функции $I(t)$:

$$I(p) = L\{I(t)\} = \int_0^{\infty} I(t) e^{-pt} dt \quad (3)$$

Рассмотрим, какие выходные сигналы регистрируются на сопротивлении R при различных входных сигналах, определяемых видом функции $E(t)$.

Простейший случай реализуется, когда электрод находится в постоянном электрическом поле $E(t) = \text{const}$, включение измерительной цепи происходит в момент $t = 0$. При этом $L\{U_0(t)\} = U_0/p$, решение системы (2) и обратное преобразование Лапласа функции $U_2(p)$ дает

$$U_2(t) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{1}{R(C_1 + C_2)} \quad (4)$$

Таким образом, при включении регистратора в постоянное поле в отсутствие метели и снегопада на ленте самописца должен отмечаться отдельный импульс, амплитуда которого равна $C_1/(C_1 + C_2) U_0$, далее сигнал спадает до нуля с постоянной времени τ (рис.3 а). Действительно, такие скачки отмечались при включении аппаратуры в отсутствие явлений переноса.

Случай резко меняющегося электрического поля можно продемонстрировать отдельными импульсами прямоугольной формы продолжительности β и амплитуды U_0 . Для отдельного импульса преобразование Лапласа имеет вид:

$$U_0(p) = \frac{U_0}{p} (1 - e^{-\beta p}) \quad (5)$$

Учитывая систему уравнений Кирхгофа, получим

$$U_2(p) = U_0 (1 - e^{-\beta p}) \frac{RC_1}{R(C_1 + C_2) + 1},$$

чему соответствует выражение для измеряемой на сопротивлении R разности потенциалов

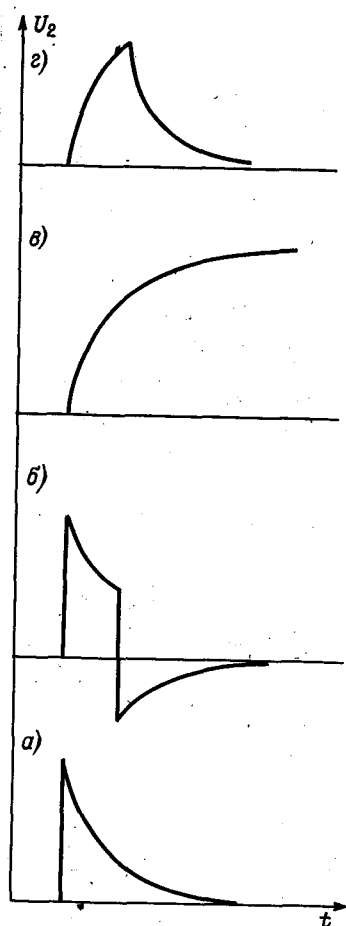


Рис.3. Графическое изображение сигнала на выходе измерителя, соответствующего решению системы уравнений.

а) решение (2); б) решение (4); в) решение (6); г) решение (7).

$$U_z(t) = L^{-1} \{ U_z(p) = \begin{cases} \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, & 0 < t < \beta, \\ -\frac{C_1}{C_1 + C_2} U_0 e^{-\frac{1}{\tau}(t-\beta)} [1 - e^{-\frac{\beta}{\tau}}], & t > \beta. \end{cases} \quad (6)$$

Решению (6) соответствует сигнал, состоящий из двух фаз, причем первая, положительная фаза, несколько превышает вторую, отрицательную. Форма сигнала представлена на рис. 3 б. Как отмечалось, двуполярные импульсы действительно наблюдаются в самом начале развития процесса переноса снега, когда отдельные порции снега, поднятые ветром с земли, не достигают электрода, но проносятся вблизи него. Благодаря тому, что отдельные частицы снега наэлектризованы, прохождение снега вблизи электрода приводит к временному скачку электрического поля в месте установления электрода. По мере усиления метели и появлении систематического переноса снег начинает ударяться об электрод; этому соответствует увеличение тока на электрод одного знака (см. рис. 1 б, в).

Непосредственное попадание частиц на электрод создает в измерительной цепи ток одного знака, что вызывается следующими причинами:

- а) передачей собственного заряда частиц снега /6/;
- б) разделением заряда между частицей и электродом, возникающим при столкновении во внешнем электрическом поле;
- в) разделением заряда, возникающим за счет удара снега о металл и раскалывания ударяющихся частиц /3, 4/.

Последняя составляющая пропорциональна квадрату скорости соударения, поэтому с увеличением скорости ветра ее вклад становится основным.

Удар метелевых частиц об электрод генерирует ток $I_0 = n v S q$, где n — концентрация частиц, S — поперечное сечение электрода, q — заряд, разделяемый при ударе отдельной частицы. Попадание частиц на электрод создает на выходе измерителя напряжение U_z . Этому случаю соответствует эквивалентная схема генератора тока

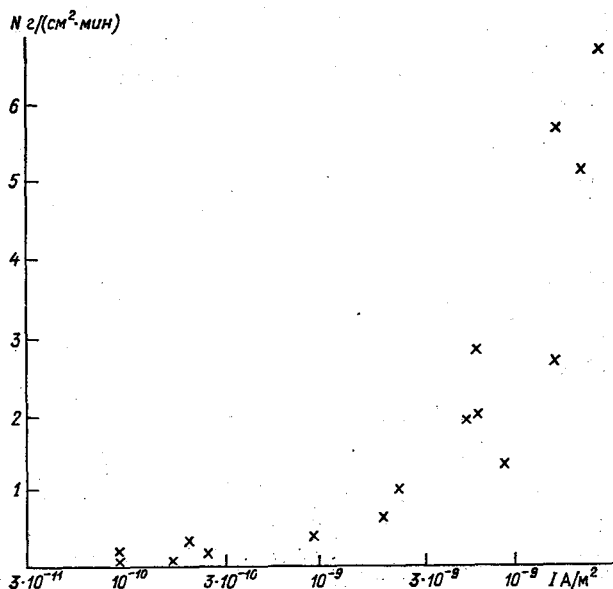


Рис. 4. Результаты одновременного измерения электрического тока I и количества переносимого снега N .

(см. рис. I в). Передаточное сопротивление цепи генератора тока

$$Z_p = \frac{U_2(p)}{I_0(p)} = \frac{R}{1 + R(C_1 + C_2)p}$$

Окончательно измеряемое напряжение в случае постоянного тока (чему соответствует сигнал, возникающий при снегопаде, сопровождаемом ветром) оказывается равным

$$U_2(t) = I_0 R (1 - e^{-t/\tau}), \quad \tau = 1/R(C_1 + C_2), \quad I_0 = n\nu S q. \quad (7)$$

При отдельных импульсах тока (чему соответствует сильный поземок, когда снег отдельными порциями поднимается до высоты электрода) сигнал на выходе имеет следующий вид:

$$U_2(t) = \begin{cases} I_0 R (1 - e^{-t/\tau}), & 0 < t < \beta, \\ I_0 R e^{-(t-\beta)/\tau} (1 - e^{-\beta/\tau}), & t > \beta. \end{cases} \quad (8)$$

Форма сигнала, соответствующего решениям (4), (6), (7), (8), представлена на рис.3.

Реальная метель может быть представлена в виде суммы постоянной составляющей и отдельных прямоугольных импульсов тока.

На рис.2 в представлена запись, сделанная во время сильного поземка, когда отмечается систематический перенос снега, на фоне которого заметны отдельные порывы ветра продолжительностью несколько минут.

Одновременно с измерениями электрического тока I производились измерения твердого расхода метели N на уровне земли. Сопоставление величин I и N (рис.4) обнаруживает зависимость между ними, которая должна существовать согласно (7).

Таким образом, систематические измерения электрического тока во время метели позволили построить теоретическую схему происходящих во время метели электрических процессов. Проведенный анализ результатов наблюдений доказывает возможность использования изученных явлений для получения дополнительной информации о метели, в частности на основе измерения электрического тока на электроде возможно создание сигнализаторов процессов переноса.

Список литературы

1. Д ю н и н А.К. Механика метелей. - Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. - 378 с.
2. Л о б о д и н Т.В. Электричество метелей // Труды ИГО. - 1962. - Вып.136. - С.62-77.
3. М о р д о в и н а Л.С. Электризация в потоке частиц // Труды ИГО. - 1972. - Вып.277. - С.71-79.
4. М о р д о в и н а Л.С. Случайная электризация частиц при столкновениях // Труды ИГО. - 1974. - Вып.301. - С.75-80.
5. Ф и л и п п о в А.Х. Результаты измерения напряженности электрического поля атмосферы в Арктике // Труды ААНИИ. - 1977. - Вып.340. - С.144-149.
6. S c h a e f e r V.J. Properties of particles of snow and the electrical effects they produce in storms // Transact. Amer. Geophys. Union. - 1947. - Vol.28, N 4. - P.587-614.

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ
ДУМЯМИ КОМПЛЕКТАМИ ПУЛЬСАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Для получения данных о метеорологическом решении в горизонтально-неоднородных условиях в июле-августе 1984 г. проводилась экспедиция Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова совместно с Институтом пустынь АН Туркменской ССР. Место проведения экспедиции - юго-запад Туркменской ССР, предгорья Копетдага, долина с песчаной поверхностью.

Во время экспедиции производились прямые измерения турбулентных потоков тепла и количества движения с помощью пульсационной аппаратуры, разработанной в ГГО /1, 5/. Аппаратура включала два двухкомпонентных ультразвуковых анемометра для измерения вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра, три пульсационных термометра на микротермисторах и пять корреляторов для получения вертикальных турбулентных потоков тепла и количества движения.

Часть измерений проводилась синхронно с градиентными наблюдениями (шесть суточных серий измерений длительностью по одному часу с часовыми перерывами). Приборы устанавливались на одной мачте на высотах 1,8 и 2,3 м или на двух мачтах на одинаковой высоте (2 м) и расстояниях между мачтами 7 и 12 м. Одна из мачт допускала возможность изменения высоты установки датчика, и с ее помощью проводился эксперимент по определению изменения вертикального турбулентного потока тепла с высотой.

Результаты измерения турбулентных потоков тепла и количества движения обнаруживают удовлетворительную сходимость с вычисленными по градиентным наблюдениям (коэффициент корреляции для потоков тепла 0,84, для скорости трения 0,7).

Сравнительные результаты прямых измерений турбулентных потоков приведены на рис.1-5, где P_1, v_{*1} и P_2, v_{*2} - вертикальные турбулентные потоки тепла и скорости трения, измеренные первым и вторым комплектом аппаратуры, P_3 - поток тепла, измеренный вторым комплектом, поднятым на высоту 5,5 м.

Результаты статистической обработки сведены в таблицу, где n - число измерений; k - коэффициент корреляции; C - коэффициент ортогональной однопараметрической регрессии в уравнении регрессии $y = Cx$ /3/. x и y - значения потоков тепла или квадратов ско-

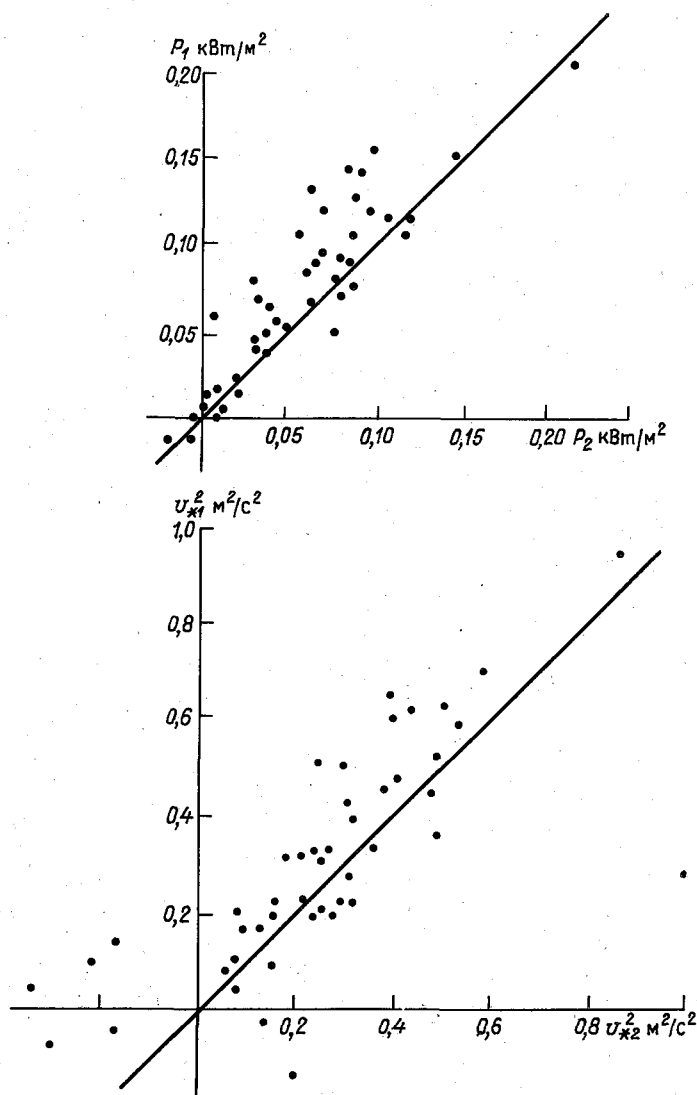


Рис. I. Турбулентные потоки тепла (P) и количества движения (U_*^2) по данным измерений на одной мачте на высотах 1,8 м (ось ординат) и 2,3 м (ось абсцисс).

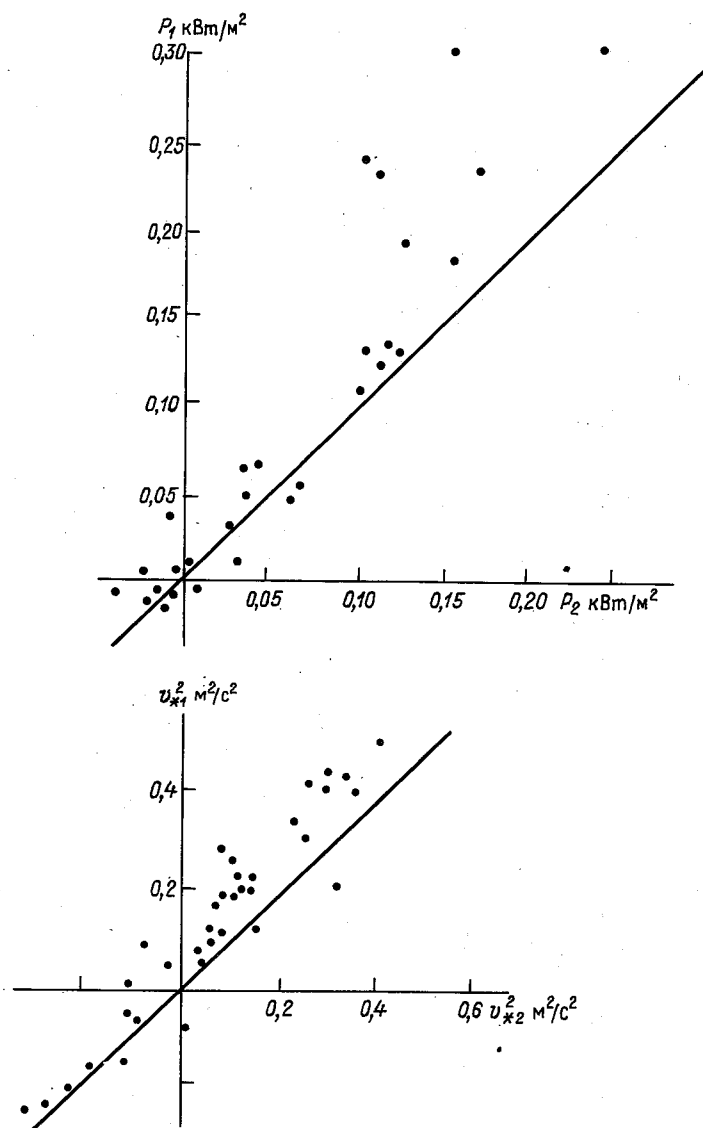


Рис.2. Турбулентные потоки тепла (P) и количества движения (v_*^2) по данным измерений на двух мачтах на высоте 2 м и расстоянии 7 м.

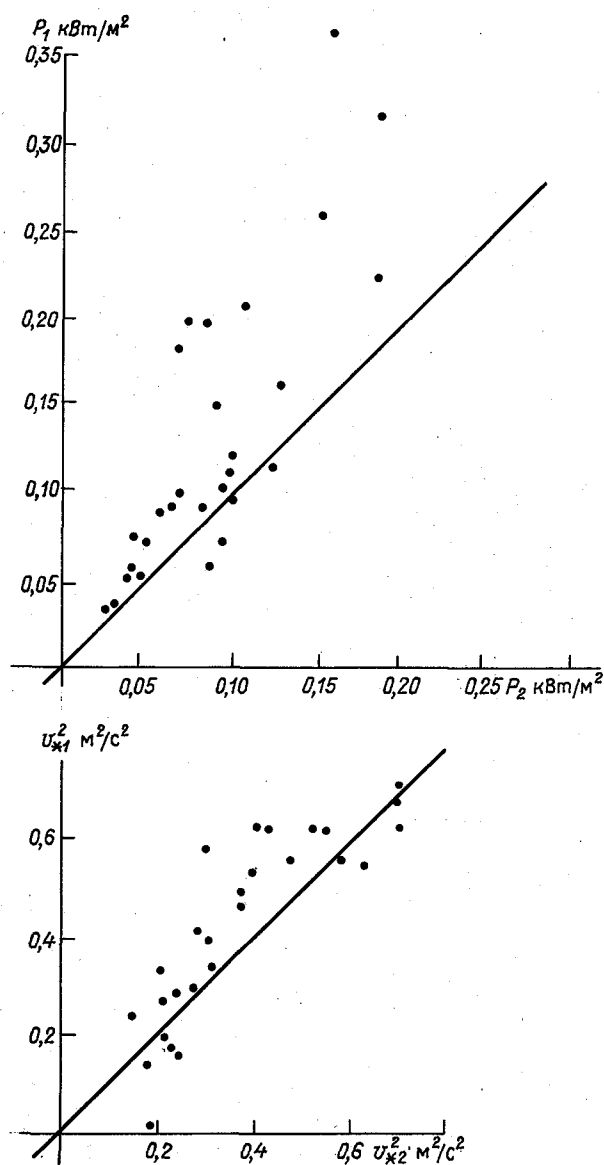


Рис.3. То же на двух мачтах на высоте 2 м и расстоянии 12 м.

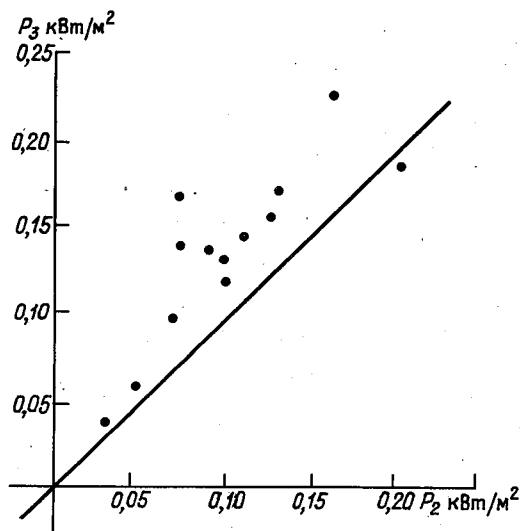


Рис.4. Зависимость потока тепла от высоты подвеса датчиков.
 P_2 - поток на высоте 1,8 м, P_3 - на высоте 5,5 м.

рости трения в разных экспериментах:

$$C = \frac{\overline{xy}}{\overline{x^2} - \overline{y^2} + \sqrt{(\overline{x^2} - \overline{y^2})^2 + 4(\overline{xy})^2}}$$

Период осреднения для данных таблицы составляет от 10 до 30 мин.

Сопоставим полученные результаты с результатами измерения турбулентных потоков двумя комплектами той же аппаратуры летом 1983 г. в пос. Колтуши Ленинградской обл., приведенными в работе /6/.

Можно убедиться, что корреляция результатов измерения потоков двумя комплектами аппаратуры на одной высоте для обоих экспериментов близка (r колеблется от 0,86 до 0,92 для P и от 0,85 до 0,91 для v_*^2). Также совпадают выводы о незначительном влиянии на корреляцию данных горизонтального разнесения приборов на расстояния до 12 м. Можно отметить, что эксперименту в пустыне соответствовала меньшая горизонтальная однородность подстилающей

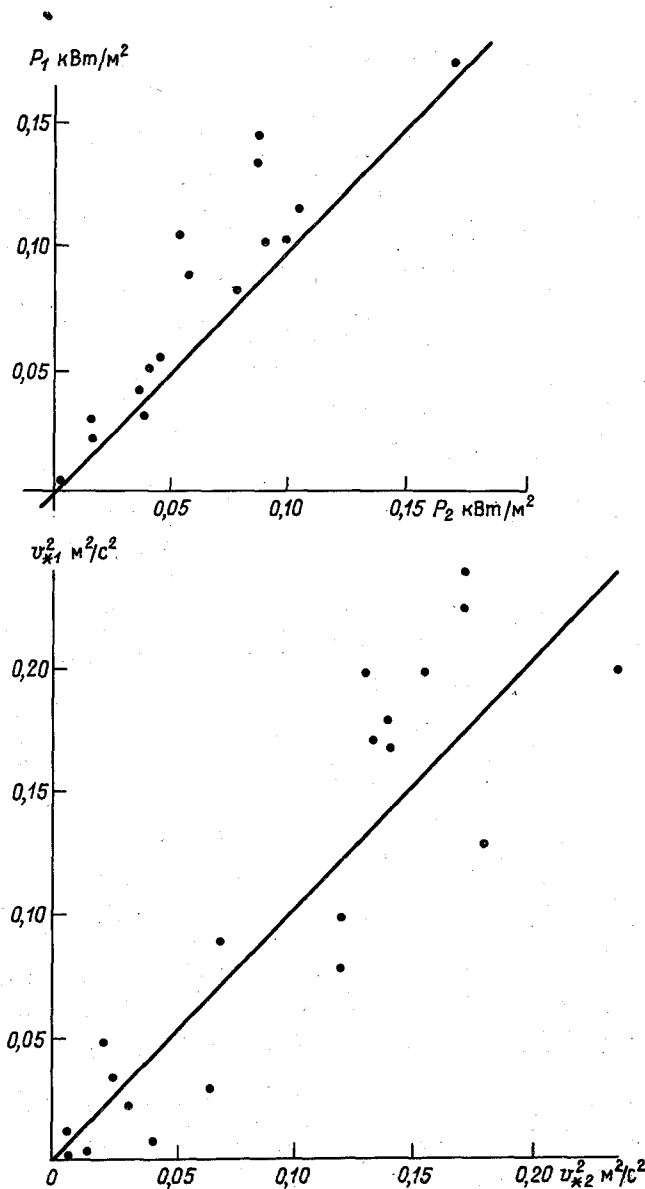


Рис.5. Турбулентные потоки тепла (P) и количества движения (v_*) по данным измерений на двух мачтах на высоте 2 м. Уровень помех во втором комплекте уменьшен.

Таблица

Номер рисунка	Условия проведения экс- перимента	n	k	x	y	c
1	Приборы на одной мачте на высоте 1,8 и 2,3 м	45	0,89	P_1	P_2	0,82
		53	0,89	v_{*1}^2	v_{*2}^2	0,75
2	Приборы на двух мачтах на расстоянии 7 м на высоте 2 м	31	0,92	P_1	P_2	0,68
		30	0,91	v_{*1}^2	v_{*2}^2	0,65
3	Приборы на двух мачтах на расстоянии 12 м на высоте 2 м	37	0,86	P_1	P_2	0,67
		41	0,88	v_{*1}^2	v_{*2}^2	0,8
4	Комплект № 2 на высоте 1,8 и 5,5 м	13	0,78	P_2	P_3	1,28

поверхности, чем в Колтушах.

Основное отличие данных, полученных в экспедиции, связано с систематическим занижением измерений P и v_{*}^2 вторым комплектом аппаратуры. Наиболее вероятной является аппаратная причина, связанная с постепенным увеличением уровня помехи в каналах анемометра второго комплекта до 10–15 % от уровня полезного сигнала, хотя перед началом экспериментов эта характеристика не превышала 5 %.

Поскольку акустическая система анемометра является резонансной и ее настройка производилась при 20 °С, в условиях экспедиции при повышении дневных температур до 45 °С проявился дрейф резонансных частот, что привело к падению амплитуды сигнала при сохранении уровня помехи. После замены излучателя во втором комплекте, когда уровень помехи стал не выше 3 %, сравнительные измерения выявили увеличение коэффициента регрессии по обоим каналам ($P_2 = 0,85 P_1$, $k = 0,895$ при $n = 17$; $v_{*2}^2 = 0,854 v_{*1}^2$, $k = 0,9$ при $n = 20$, см. рис.5).

Был также проведен эксперимент по измерению потоков тепла на двух высотах. Поскольку систематические и случайные расхождения показаний двух комплектов при одновременных измерениях на разных высотах не могли дать достаточной точности для оценки изменения потока с высотой, была принята следующая методика эксперимента. Поток тепла измерялся синхронно двумя комплектами аппаратуры,

причем первый устанавливался на высоте 2 м и контролировал изменение потока во времени, а второй измерял поток последовательно на высотах 1,8 и 5,5 м. Данные выбрасывались, если изменение показаний первого комплекта P_1 имело один знак с P_2 и превышало 10 %. Следует отметить, что комплект аппаратуры, измерявший потоки на разных высотах, был оснащен двумя каналами измерения пульсаций температуры с общим анемометром, два канала потока тепла давали близкие показания с коэффициентом корреляции 0,99, а в качестве результата брались средние значения. Это повышало надежность данных.

Как видно из таблицы и рис. 4, поток растет в среднем на 30 % при росте высоты от 1,8 до 5,5 м в дневные часы, однако иногда этого роста не наблюдается. В этом случае на ленте самописца было заметно даже уменьшение амплитуды пульсаций температуры с высотой. Результаты измерений потоков тепла на двух высотах находятся в хорошем согласии с данными, полученными в работе /2/.

Следует отметить небольшой объем полученных данных. В ходе экспедиции были использованы некоторые методы для оценки достоверности данных и контроля работы аппаратуры.

С целью проверки точности устройств обработки в полевых условиях была проведена небольшая серия (16 опытов) в режиме параллельной работы приемных блоков двух комплектов аппаратуры /5/ от одного передающего блока. Проверялись каналы количества движения как наиболее опасные. Полученные данные (коэффициент корреляции 0,982 и коэффициент регрессии 0,95) свидетельствуют о приемлемой точности устройств обработки.

Из других поверочных экспериментов следует отметить проверку на факт перегрева термистора (бусинка $\varnothing$ 0,15 мм) солнцем. Проверка происходила при установке датчика в рабочем положении на высоте 2 м при наличии круглого экрана $\varnothing$ 10 см, который располагался на расстоянии 50 см от датчика. При затемнении датчика и без него не было замечено сдвига кривой пульсаций температуры на ленте самописца, и был сделан вывод об отсутствии перегрева. При этом скорость ветра была около 3 м/с, амплитуда пульсаций температуры - примерно 1 °C.

Следует отметить проявившуюся во время экспедиции нестабильность показаний электролитических интеграторов X-607, применяемых как осредняющие и показывающие приборы, проверка которых от контролируемого цифровым вольтметром источника постоянного напряжения регулярно проводилась. Хотя погрешность для основных интеграторов потоков тепла не вышла за 5 % при числе опытов $n = 35$, для дру-

гих приборов она достигала и 50 %, что обусловлено их температурным дрейфом. Этот узел аппаратуры требует модернизации путем перехода к цифровым методам осреднения.

Была также оценена погрешность измерения турбулентного потока тепла от изменения динамических характеристик пульсационного термометра, связанная с изменением сопротивления первичного измерительного преобразователя. Сопротивление термистора уменьшается с изменением температуры в соответствии с паспортными данными примерно в 2 раза при изменении температуры от 20 до 45 °С.

Данная характеристика, меняя общий коэффициент усиления вторичного измерительного преобразователя, изменяет ширину полосы пропускания канала пульсаций температуры. Погрешность потока тепла в зависимости от ширины полосы пропускания канала исследована в /4/. Эта погрешность при использовании данных /3/ о корреляционной функции потока тепла при условии, что постоянная времени канала температуры меняется от 100 до 200 с, составляет 3,5 %, т.е. невелика.

В заключение следует отметить, что аппаратура сохранила работоспособность в условиях экспедиции. Имеется тенденция к занижению показаний потоков, связанная с относительным увеличением уровня помехи в условиях повышенных окружающих температур.

Значение коэффициента корреляции при сравнении данных двух комплектов аппаратуры осталось на том же уровне, что и в полевом эксперименте в Колтушах, не зависит от разнесения датчиков, устанавливаемых на одной высоте, на несколько метров по горизонтали и составляет 0,85–0,91. Для ряда задач физики приземного слоя атмосферы желательно иметь лучшую сходимость результатов. Эта величина не может быть объяснена никакими из перечисленных выше, а также в /6/ погрешностей. Из проведенных поверочных экспериментов следует, что расхождение результатов возникает на входе каналов анемометров.

Пути дальнейшего совершенствования аппаратуры состоят в изменении конструкции приемной части канала анемометра с целью уменьшения акустических теней, в замене электролитических интеграторов на цифровые средства обработки и отображения результатов, в разработке канала измерения потока влаги.

Список литературы

1. А.с. 853584. СССР. Устройство для измерения турбулентных переносов / С.М.Персин, Н.Г.Поликахина, Л.А.Шепановская. - Бюл.

изобретений. - 1981. - № 29.

2. Зубковский С.Л., Кухарен В.П., Цванг Л.Р. Вертикальные профили характеристик турбулентности в приземном и пограничном слоях атмосферы при неустойчивой стратификации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. - № 1. - С.44-52.

3. Комплекс аппаратуры для измерения турбулентных потоков тепла и влаги в приземном слое атмосферы / М.Н.Яккер, Ю.А.Песчанский, Л.А.Кащенко, Б.А.Дмитриев. - Л.: Гидрометеоиздат, 1976. - 66 с.

4. Персин С.М. Вопросы методики измерений турбулентных переносов // Труды ИГО. - 1982. - Вып.465. - С.119-129.

5. Персин С.М., Поликашина Н.Г., Щепановская Л.А. Устройство для получения турбулентных потоков // Труды ИГО. - 1985. - Вып.476. - С.118-123.

6. Персин С.М., Щепановская Л.А. Измерение турбулентных потоков двумя комплектами пульсационной аппаратуры // Труды ИГО. - 1986. - Вып.512.

Т.П.Грибова, Л.А.Грошева

ОБ УТОЧНЕНИИ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ РЕЖИМНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ЕС ЭВМ

В связи с оснащением вычислительных центров Госкомгидромета СССР ЭВМ ЕС и переводом автоматизированной обработки режимной информации на эту серию ЭВМ возникла необходимость создания новых программ критического контроля метеорологической информации.

Программа критического контроля, разработанная для ЭВМ "Минск-32", достаточно эффективно выявляла сомнительные и ошибочные значения в результатах наблюдений станций. Поэтому в основу нового комплекса программы контроля положены методы и алгоритмы, использованные и проверенные в предыдущем комплексе /2, 4/. Наряду с этим внесены ряд изменений и уточнений в отдельные алгоритмы, увеличено количество контролируемых метеорологических величин, доработаны формы некоторых таблиц результатов, изменено их содержание и т.д.

Изменения, внесенные в алгоритмы программы, подсказаны либо опытом детального анализа результатов контроля, либо связаны с особенностями контроля метеорологических величин, впервые включенными в новую программу контроля.

Как в предыдущем комплексе программ, так и в новом, алгоритм программы контроля предусматривает не только вычисление невязки отдельной метеорологической характеристики, но также и анализ невязки, превысившей определенную величину, называемую критерием достоверности /4/. Оценка качества результатов наблюдений и выявление конкретной метеорологической величины, вызывающей сомнение и требующей от специалиста дополнительного анализа, выполняется только для величин, для которых в программе заданы критерии достоверности.

Ряд метеорологических величин уже был и ранее обеспечен критериями достоверности. В новом комплексе программ список таких метеорологических величин по возможности максимально увеличен. В качестве критериев достоверности взяты как допуски браковки, использовавшиеся ранее при ручном критическом контроле, так и критерии, вычисленные позднее по материалам автоматизированного критического контроля метеорологической информации /4/. Перечень значений критериев достоверности, дополнительно включенных в новый комплекс программ для анализа невязок, приведен в таблице. Здесь же приведено значение уточненного критерия температуры точки росы.

Критерии достоверности, заложенные в программу

№ п/п	Метеорологический элемент	Предельно допустимая невязка
I	Температура точки росы, °C	I,0
2	Разность среднего месячного минимального значения температуры воздуха и минимального из средних месячных значений за восемь сроков, °C	0,5
3	Разность среднего месячного максимального значения температуры воздуха и максимального из средних месячных значений за восемь сроков, °C	0,5
4	Разность средних месячных максимального и минимального значений температуры воздуха, °C	I,0
5	Разность среднего месячного минимального значения температуры поверхности почвы и минимального из средних месячных значений за восемь сроков, °C	I,0
6	Разность среднего месячного максимального значения температуры поверхности почвы и максимального из средних месячных значений за восемь сроков, °C	I,0
7	Отношение количества нижней облачности к количеству общей	0,15
8	Число ясных дней по общей облачности	3
9	Число пасмурных дней по общей облачности	4
10	Число ясных дней по нижней облачности	4
11	Число пасмурных дней по нижней облачности	4
12	Разность максимального за месяц и среднего месячного значений скорости ветра	4

Контроль средних месячных значений метеорологических величин по срокам выполняется по тем же алгоритмам, что и средних месячных значений величин за сутки. Поскольку специально для каждого из сроков критерии достоверности метеорологических величин не вычислялись, для анализа невязок по срокам привлечены критерии достоверности, применяемые для средних месячных (суточных) величин.

Специалисту при оценке качества информации важно выявить именно те случаи, когда информация самой контролируемой станции вызывает сомнение. Из опыта известно, что невязка интерполяции может превышать критерий достоверности по целому ряду причин, а не только вследствие ошибочного значения метеорологической величины на контролируемой станции. Поэтому в новом комплексе программ при анализе невязки акцент сделан не просто на выделение невязок, превышающих установленный критерий достоверности, но на определение "сомнительности" метеорологической величины на контролируемой станции.

Для этого вычисляются разности значений метеорологических величин контролируемой станции и каждой из ее влияющих. Во внимание принимается как знак разности, так и ее значение. Значение метеорологической величины на контролируемой станции признается сомнительным, если все разности оказываются одного знака и превышают значение установленного критерия. Если станция признается сомнительной, анализ невязок программой на этом заканчивается, а информация, по которой выполнялся контроль, помещается в "Сводную таблицу".

Для метеорологических величин, не имеющих критериев достоверности, помимо невязки, вычисленной по формуле и соответствующей признаку контроля станции, в новой программе рассчитывается еще невязка от среднего арифметического значения метеорологической величины по группе влияющих станций. Двойной расчет невязки введен с целью исключить погрешность, возникающую при расчете аппроксимирующей плоскости, в случае расположения влияющих станций близко к прямой линии. В таблицу результатов в этом случае помещается меньшая по абсолютному значению невязка.

Критерии достоверности метеорологических величин, включенные в программу, взяты едиными для всех регионов и сезонов года. В основном это оправдано, но для корректного выполнения анализа результатов контроля иногда необходимо уточнить имеющиеся критерии достоверности для различных физико-географических условий и сезонов года и получить новые для тех метеорологических величин, которые в настоящее время критериями не обеспечены.

Поэтому в новой программе контроля предусмотрен расчет средней квадратической невязки по территории каждого управления по гидрометеорологии практически для всех контролируемых метеорологических величин. Исключения составляют температура почвы на глубинах, направление ветра по румбам (в градусах), повторяемость направления и атмосферное давление.

Средняя квадратическая невязка σ_{Δ_i} /4/ вычисляется по формуле

$$\sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \Delta_i)^2}{n}}{n-1}},$$

где Δ_i - значение невязки метеорологической величины, n - количество невязок, учтенных при вычислении σ_{Δ_i} по территории контролируемого управления по гидрометеорологии.

При расчете средней квадратической невязки для метеорологических величин, имеющих критерии достоверности, учитываются только невязки, не превышающие по абсолютному значению удвоенное значение критерия. Средняя квадратическая невязка метеорологической величины, для которой критерий достоверности не задан в программе, включает все невязки.

В ранее действующих программах по результатам контроля средних месячных выводов по температуре почвы на глубинах под оголенной поверхностью в таблицу выводились невязки интерполяции для глубин 5, 10, 15 и 20 см и значения градиентов температуры почвы для слоев 5-10, 10-15, 15-20 см. Вследствие ограниченного количества глубин, на которых производятся измерения температуры почвы под оголенной поверхностью, невязки для этого вида информации не являются показательными и не дают специалисту четкого определения "ошибочной глубины". Так, если отклонение значения температуры почвы от правильного находится в пределах $0,5^\circ\text{C}$ на графике вертикального распределения, невязки по абсолютному значению не превышают $0,2^\circ\text{C}$. Если средние месячные значения температуры почвы получены всего на трех глубинах, то все невязки оказываются равными нулю /1/, хотя при этом в профиле могут быть ошибочные значения температуры почвы. По этой причине в новой программе невязки интерполяции температуры почвы на глубинах под оголенной поверхностью не вычисляются. Для анализа специалисту в таблице представлены градиенты средней месячной, минимальной и максимальной температуры почвы, вычисленные для слоя 5 см.

Таблица градиентов позволяет специалисту проследить их ход на каждой станции сразу для средней месячной, максимальной и минимальной температуры и сравнить градиенты контролируемой станции с градиентами окружающих станций в данном районе.

В процессе контроля температуры почвы на глубинах под есте-

ственным покровом в программе предусмотрен поиск ошибочных значений температуры /4/. В случае если задано всего четыре значения температуры, поиск осложняется, поскольку первое же исключенное из профиля значение температуры почвы приводит к совпадению вычисленного и фактического профилей и не позволяет установить действительную "сомнительную глубину". Поэтому для таких ситуаций пересчет выполняется с исключением всех возможных значений температуры почвы в профиле, а затем на сомнение выдается глубина, на которой невязка оказалась наибольшей по абсолютному значению.

В новой программе расширен список контролируемых метеорологических величин. Так, контроль проходят "продолжительность в часах" ряда атмосферных явлений, число случаев метеорологической дальности видимости для градаций < 1 км и > 10 км. Для числа случаев скорости ветра по градациям дополнительно к градациям I, 2-3, 4-5, 6-7, 8-9 м/с введен контроль суммы градаций от 10 м/с и по градацию > 40 м/с включительно. В качестве дополнительной характеристики к атмосферным явлениям введен контроль отношения продолжительности в часах туманов (ТТ0) к числу случаев метеорологической дальности видимости < 1 км.

Все перечисленные метеорологические величины контролируются методом линейной интерполяции, и невязки помещаются в соответствующие таблицы.

В связи с тем что на одной станции программа наблюдений может включать проведение снегосъемок по лесному и полевому маршрутам, в новом комплексе программ предусмотрена возможность контроля результатов снегосъемок обоих маршрутов при условии, что снегосъемки на каждом маршруте проводились не менее чем на трех влияющих станциях.

Помимо перечисленных, новой режимной характеристикой, подвергающейся контролю, является повторяемость в процентах форм облачности. Контроль ее осуществляется путем логического сопоставления повторяемости различных форм облачности на контролируемой и влияющих станциях.

В новом комплексе программ введен также контроль по уравнениям связи числа дней с изморозью или пыльной бурей в их продолжительностью в часах. Каждое управление по гидрометеорологии может выбирать для контроля то атмосферное явление из двух, которое на территории управления имеет наибольшую повторяемость и представляет интерес. Предусмотрена также возможность дальнейшего увеличения количества контролируемых атмосферных явлений этим методом.

Изменения, внесенные в программу, уменьшили затраты ручного труда и облегчили анализ невязок и проведение критического контроля режимной метеорологической информации.

В настоящее время программа контроля работает во всех вычислительных центрах.

Список литературы

1. Беспалов Д.П., Грибова Т.П. Основы методики контроля распределения температуры почвы на глубине // Труды ГГО. - 1975. - Вып.345. - С.33-36.

2. Беспалов Д.П., Грибова Т.П., Грошева Л.А. Пространственный контроль режимной метеорологической информации на ЭВМ // Труды ГГО. - 1981. - Вып.449. - С.15-22.

3. Грибова Т.П., Грошева Л.А. Рекомендации по анализу результатов пространственного контроля метеорологических элементов на ЭВМ // Труды ГГО. - 1981. - Вып.449. - С.23-30.

4. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. - Л.: Гидрометеиздат, 1981.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В АЛГОРИТМАХ ИЗ ВНУТРИСТАНЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ (НА ПРИМЕРЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ)

В основе автоматизированного критического контроля большинства режимных метеорологических характеристик лежит анализ и использование пространственных или пространственно-временных связей этих характеристик между собой. Иными словами, межстанционный контроль осуществляется на основании результатов анализа метеорологических полей /3/. Однако этот способ контроля не универсален.

Во-первых, он не применим для изолированных станций (например, в горных районах, где непрерывная метеорологическая сеть отсутствует), а также для станций с резкими микроклиматическими особенностями (например, на побережьях морей или больших внутренних акваторий).

Во-вторых, для ряда характеристик с особенно большой пространственной изменчивостью (так называемых "пятнистых") существующая даже в равнинных условиях и густонаселенных районах сеть оказывается недостаточной для обеспечения надежного межстанционного контроля. К числу таких характеристик относятся, например, количество и продолжительность атмосферных осадков, число дней с количеством осадков разных градаций, число дней с различными атмосферными явлениями (дождями, снегопадами, метелями, грозами, туманами, гололедом и др.), некоторые характеристики влажности воздуха, температура почвы на глубинах, а также экстремальные величины наблюдаемых метеорологических характеристик. В этих условиях применяется внутривостанционный контроль, использующий физико-статистический анализ связей между характеристиками, наблюдаемыми в одном пункте. В основе этих связей лежит единство физического процесса, отражаемого комплексом наблюдаемых характеристик, объединенных общим происхождением, т.е. связанных генетически.

В настоящее время в процессе внутривостанционного контроля генетические связи используются в виде линейных уравнений регрессии, параметры которых определяются по временному ряду наблюдений на каждой конкретной станции. Основные недостатки такого подхода состоят в том, что линейная корреляция между контролируемыми характеристиками часто оказывается недостаточно высокой для надежного выявления ошибок. Кроме того, необходимость предварительного анализа временного ряда на каждой станции сильно затрудняет тех-

ническое осуществление контроля. Существует также ряд характеристик, которые пока еще совсем не контролируются, так как не выявлены и не определены связи, пригодные для разработки соответствующих алгоритмов. В этих обстоятельствах очевидной необходимостью становится глубокое и разностороннее физико-статистическое исследование генетических связей с целью определения вида и численных параметров наиболее тесных зависимостей между отдельными характеристиками или их комплексами, наблюдаемыми разными методами и приборами, но объединенными общностью физического процесса.

Следует также иметь в виду постоянную тенденцию к сокращению числа пунктов метеорологической сети, обусловленную главным образом экономическими причинами. При этом необходимо сохранять объем и качество получаемой информации, чтобы не допустить ухудшения обслуживания народного хозяйства. Иными словами, первоочередной задачей становится получение надежной и высококачественной информации по более редкой сети наблюдательных пунктов. В этих условиях возрастает значимость именно внутристанционного контроля в общей системе автоматизированного контроля результатов наблюдений. И, кроме того, использование генетических связей дает возможность по меньшему объему непосредственно наблюдаемых величин получать дополнительную и разностороннюю информацию, целенаправленно ориентированную на определенное практическое использование.

Разработка такого рода была выполнена для ряда характеристик атмосферных осадков, которые в настоящее время либо не контролируются совсем (месячная продолжительность осадков, число дней с осадками $\geq 0,1$ мм за месяц, месячная выборка числа дней с разным количеством осадков), либо контролируются ненадежно (месячное количество осадков). Ниже предлагаются и обосновываются алгоритмы контроля и восстановления этих независимо определяемых характеристик, основанные на их взаимной генетической обусловленности.

Продолжительность осадков (τ) и число дней с осадками $\geq 0,1$ мм ($D_{0,1}$) за месяц

Связь между этими характеристиками физически очевидна, и априори ясно, что она различна в разные сезоны. В работе /1/ на основе анализа средних многолетних месячных значений τ и $D_{0,1}$ по материалам Справочника по климату СССР /4/ для ряда станций в разных климатических условиях показано, что соотношение между числом дней с осадками и продолжительностью осадков определяется главным образом температурными условиями, но зависит также и

от режима влажности воздуха. Формула, характеризующая данную зависимость, имеет вид

$$\tau = 0,01 D_{0,1}^{1,5} e^{\alpha} (100 - \gamma) \cdot 10^{\alpha + \beta t}, \quad (I)$$

где τ - средняя многолетняя месячная продолжительность осадков (в часах); $D_{0,1}$ - среднее число дней с осадками за месяц; e - парциальное давление водяного пара (гПа); γ - относительная влажность воздуха (%); t - температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); α и β - постоянные; в среднем, для всех климатических условий, в которых получена формула (I), $\alpha = -0,355$, $\beta = -0,0699$.

Проверка формулы (I) на независимом материале показала, что средняя квадратическая разность между рассчитанными по формуле (τ^p) и фактически наблюдаемыми (τ^f) значениями продолжительности осадков, определенная из выражения

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{\tau^p - \tau^f}{\tau^f} \cdot 100 \right)^2}{n-1}},$$

составляет $\pm(21...24)\%$.

В работе /I/ было показано, что систематические отклонения данных отдельных станций от кривой, описываемой уравнением (I), незначительны, т.е. региональные различия в параметрах этой связи невелики. Однако для уточнения формулы (I) в применении к каждой конкретной станции целесообразно определить и использовать в дальнейшем ее индивидуальные значения коэффициентов α и β . Вполне вероятно, что пространственная изменчивость этих коэффициентов невелика (поскольку малы региональные различия), и, значит, возможно предварительное районирование или картографирование их значений для всей территории СССР по выборочной ограниченной сети станций, что облегчит дальнейшую процедуру контроля без ущерба для ее точности.

Проверка возможности использования формулы (I) для контроля месячных значений продолжительности осадков и числа дней с осадками за отдельные годы была сделана по материалам текущих наблюдений из метеорологических ежемесячников за 1981-1983 гг. Для станций Воейково и Минск были выбраны данные обо всех параметрах, входящих в формулу (I), т.е. месячные значения τ , $D_{0,1}$, t , e и γ . Расчеты показали, что для конкретных месячных величин, так же как и для средних многолетних, связь между соотношением

от линии связи, описываемой уравнением (2).

Очевидно, что величина $\lambda \bar{b}_5$ — постоянный критерий для отношения D_x/D_0 , но выражение его в днях для значений D_x будет в каждом месяце иным в зависимости от величины D_0 .

Описанный способ контроля выборки числа дней с осадками разных градаций касается проверки достоверности значений D_x в каждой выборке. Однако каждая такая выборка характеризуется еще и углом наклона интегральной кривой числа дней, т.е. коэффициентом C в уравнении (2). Из общезначимых соображений вполне очевидно, что величина C определяется режимом выпадения осадков, а именно: в районах умеренного увлажнения с преобладанием обложных дождей небольшой интенсивности и в холодный сезон этот угол будет больше, чем в обильно увлажненных районах в летние месяцы с сильными ливнями. Выявление зависимости коэффициента C от интенсивности осадков было сделано на материале нескольких станций с резко различным режимом увлажнения, расположенных на северо-западе СССР (Минск, Воейково), на Кавказе (Местия), в Сибири (Красноярск, Туруханск) и на Колыме (Магадан, Омогон). По данным наблюдений перечисленных станций за 1981–1983 гг. исследовалась связь между коэффициентом C и средней за месяц характеристикой интенсивности выпадения осадков (I), полученной делением месячного количества осадков (R мм) на число дней с осадками за месяц, т.е. $I = R/D_{0.1}$ мм/сут. (Здесь, по-видимому, более естественным и надежным было бы характеризовать среднюю интенсивность отношением месячного количества осадков к их месячной продолжительности (T_z), т.е. величиной R/T_z мм/ч. Однако величина T_z , наблюдаемая на станциях, не определяется на постах. Поэтому для общеприменимости алгоритма вместо T_z взято число дней с осадками как характеристика, определяемая повсеместно.)

Связь между величинами C и I оказалась линейной в полулогарифмических координатах, т.е. соответствующей уравнению

$$C = p + q \lg I, \quad (3)$$

где p и q — постоянные параметры прямой.

В таблице приведены статистические характеристики этой связи для всех использованных станций, а именно: коэффициент корреляции между C и $\lg I$ — $r_{C, \lg I}$; среднее квадратическое отклонение от линии регрессии $C/\lg I$ значений C за отдельные месяцы S_c ; число месяцев, использованных в расчетах для каждой станции n ; среднее значение $\bar{C}$ и среднее квадратическое отклонение $\bar{b}_c$.

Статистические характеристики связи значений C и $\lg I$

Станция	$r_{C, \lg I} \pm \sigma_r$	$S_c = \sigma_c \sqrt{1 - r^2}$	n	$\bar{C}$	σ_c
Воейково	$-0,79 \pm 0,06$	$\pm 0,09$	44	0,40	0,15
Минск	$-0,75 \pm 0,08$	$\pm 0,13$	31	0,38	0,15
Местия	$-0,81 \pm 0,06$	$\pm 0,06$	32	0,42	0,11
Красноярск	$-0,83 \pm 0,06$	$\pm 0,09$	29	0,48	0,16
Туруханск	$-0,78 \pm 0,07$	$\pm 0,08$	29	0,39	0,12
Магадан	$-0,84 \pm 0,08$	$\pm 0,07$	26	0,47	0,13
Омолон	$-0,75 \pm 0,09$	$\pm 0,13$	26	0,51	0,19

На рис. I показаны графики зависимости коэффициента C от $\lg I$ для станций Воейково и Магадан.

Достаточно высокие значения коэффициента корреляции, приведенные в таблице, позволяют считать данную зависимость пригодной для использования при контроле обеих входящих в нее характерис-

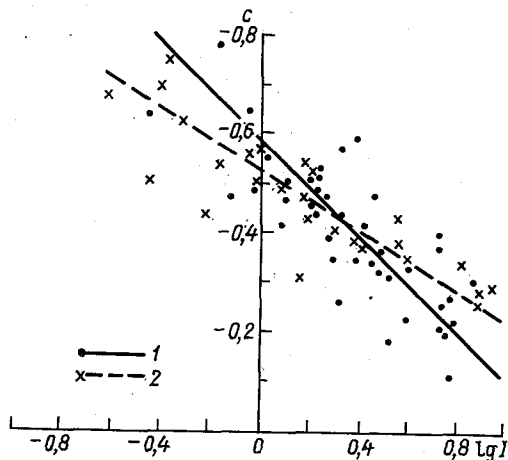


Рис. I. Зависимость углового коэффициента C уравнения (2) от интенсивности осадков I .

1 - Воейково, 2 - Магадан.

тик: и коэффициента C , определяющего интегральную кривую числа дней с осадками разных градаций, и интенсивности осадков. А поскольку интенсивность I в нашем выражении есть отношение количества осадков R к общему числу дней с осадками $D_{0,1}$, которое контролируется независимо (см. выше), то данная связь может служить также и для контроля месячного количества осадков R .

Последовательность действий по взаимному контролю коэффициента C , характеризующего угол наклона интегральной кривой числа дней с осадками разных градаций, и месячного количества осадков R на каждой конкретной станции может определяться такой схемой:

- на основе материалов данной станции за прошлые годы для каждого месяца рассчитывается ряд значений коэффициента C в уравнении (2) и ряд значений $\lg I$:

$$C = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \tau_{x,y}; \quad \lg I = \lg \frac{R}{D_{0,1}}$$

- по этим данным рассчитываются величины S_C и $S_{\lg I}$ - средние квадратические отклонения индивидуальных значений C и $\lg I$ от линий регрессии $C/\lg I$ и $\lg I/C$:

$$S_C = \sigma_C \sqrt{1 - r_{C, \lg I}^2},$$

$$S_{\lg I} = \sigma_{\lg I} \sqrt{1 - r_{C, \lg I}^2};$$

- удвоенные значения S_C и $S_{\lg I}$ принимаются за критерии достоверности наблюдаемых месячных значений обеих контролируемых характеристик;

- по ряду месячных значений C и $\lg I$ методом наименьших квадратов определяются индивидуальные для данной станции значения p и q в формуле (3).

Все эти операции делаются для каждой станции один раз, чтобы затем иметь постоянные значения p и q в формуле (3) при расчете C и $\lg I$ в контролируемом месяце и величины $2S_C$ и $2S_{\lg I}$ как критерии достоверности.

Далее ежемесячно для взаимного контроля месячной выборки числа дней с осадками разных градаций (ее характеристики C) и количества осадков R (через величину $\lg I$) рассчитываются значение C по формуле (2), т.е. по ряду значений D_x/D_0 и x , и

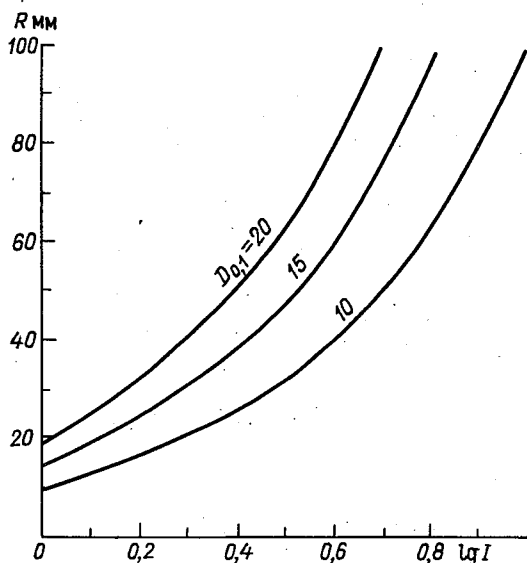


Рис.2. Связь между количеством (R) и интенсивностью (I) осадков при разном числе дней с осадками $\geq 0,1$ мм ($D_{0,1}$) за месяц.

значение $lg I$ по величинам R и D_0 за данный месяц. Затем по формуле (3) определяются расчетные значения C^P и $lg I^P$ с использованием известных коэффициентов p и q . Если разности $\Delta C = C - C^P \leq 2S_C$ и $\Delta lg I = lg I - lg I^P \leq 2S_{lg I}$, то контролируемые характеристики можно считать достоверными в пределах данных критериев. Если же $\Delta C > 2S_C$ и $\Delta lg I > 2S_{lg I}$, то дополнительному анализу подлежат как выборки числа дней, так и количества осадков.

Определим чувствительность данного метода при контроле месячного количества осадков R , т.е. величину изменения ΔR , соответствующую критерию $2S_{lg I}$.

На рис.2 даны три кривые изменения R в зависимости от $lg I$ при $D_{0,1} = 10, 15$ и 20 дням в месяц. Из рисунка видно, что изменение $\Delta lg I$ на значение критерия достоверности, например, $2S_{lg I} = 0,14$ (эта величина взята из конкретного расчета для

ст. Воейково) соответствует разным значениям $\Delta \bar{R}$ как в зависимости от $D_{0,1}$, так и от самой величины $\lg I$. Так, при значении $\lg I = 0,2$ и $D_{0,1} = 15$ величина $\bar{R}$ составляет 24 мм и может меняться в диапазоне от 18 до 34 мм, а при $\lg I = 0,6$ $\bar{R} = 60$ мм при возможном диапазоне изменения от 44 до 82 мм. Таким образом, данный критерий служит хотя и весьма приближенным, но пока единственным для контроля месячного количества осадков в отдельном пункте.

Здесь нужно заметить, что применяемый в настоящее время критерий для межстанционного контроля количества осадков представляет собой в относительном выражении величину того же порядка /3/. Следовательно, достигается возможность равноценного контроля (а при необходимости и восстановления) данных о количестве осадков на всех станциях в любых физико-географических и климатических условиях.

Список литературы

1. Богданова Э.Г. Метод косвенного расчета средних многолетних величин продолжительности осадков // Метеорология и гидрология. - 1980. - № 6. - С.33-37.
2. Богданова Э.Г. О возможности контроля и восстановления информации о числе дней с осадками разных градаций // Труды ГГО. - 1986. - Вып.512. - С.16-19.
3. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 70 с.
4. Справочник по климату СССР. Ч.4, вып. I-34. - Л.: Гидрометеиздат, 1967-1970.

ОБ ОПЫТЕ КРИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВЛАЖНОСТЬЮ ВОЗДУХА

Основной задачей проведения пространственного критического контроля наблюдений за влажностью воздуха на ЭВМ является оценка их достоверности и однородности. Основу методики пространственного контроля, разработанной в ИГО /2, 4/ для равнинной территории, составляет анализ соответствия наблюдаемых на каждой станции месячных значений полю анализируемой величины, построенному путем аппроксимации значений по данным окружающих (влияющих) станций.

В результате контроля для всех месяцев каждой станции вычисляется невязка (разность между наблюдаемым и рассчитанным значениями). Материалы наблюдений, невязки которых превышают установленные критерии достоверности /3/, подвергаются дополнительному тщательному анализу. Невязки, превышающие критерии достоверности, могут быть обусловлены следующими причинами:

- недостаточно правильным выбором влияющих и расположением их вокруг контролируемой станции;
- несоответствием используемых климатических норм существующему местоположению метеорологической площадки или отсутствием норм;
- наличием ошибочных данных (грубых ошибок) на контролируемой или влияющих станциях;
- плохим качеством наблюдений на контролируемой или влияющих станциях вследствие нарушения методики производства и обработки наблюдений или производства наблюдений по неисправным приборам.

С целью установления эффективности контроля наблюдений за влажностью воздуха и основных причин, обуславливающих недостоверность информации, был выполнен анализ около 200 случаев, когда полученные невязки интерполяции превышали принятые критерии достоверности: относительная влажность воздуха - 3 %, парциальное давление водяного пара для зимы - 0,3 гПа, для лета - 0,5 гПа. Для анализа были использованы материалы наблюдений Северо-Западного, Украинского, Приволжского и Уральского управлений по гидрометеорологии за 1983 г. Результаты проведенной работы представлены в табл. I.

По данным табл. I видно, что число случаев с большими невязками из-за плохого качества производства и обработки наблюдений меняется в пределах от 6 (Уралгидромет) до 23 (Приволжскгидро-

Таблица I

Количество случаев с невязками интерполяции по относительной влажности воздуха, превышающими критерии достоверности

Гидромет	Количество метеорологических станций	Общее количество случаев	Количество случаев из-за плохого качества производства наблюдений и обработки
Северо-Западное	124	20	10 (50 %)
Украинское	207	56	10 (18 %)
Приволжское	104	67	23 (34 %)
Уральское	163	16	6 (38 %)

мет), что в процентах от общего числа случаев составляет 38 и 34 %.

Рассматриваемые случаи с большими невязками в основном обусловлены либо нарушением методики производства наблюдений, либо производством наблюдений по неисправным приборам. Одним из наиболее распространенных нарушений в методике производства наблюдений является неудовлетворительное смачивание батиста смоченного термометра. В производстве наблюдений по неисправным приборам чаще всего встречаются случаи, когда наблюдения производятся по неисправным гигрометрам вследствие изменения чувствительности волоса (пониженная или повышенная чувствительность) в основном из-за трения в оси гигрометра, загрязнения волоса, примерзания стрелки гигрометра, растяжения волоса. При анализе невязок интерполяции за 1983 г. были выявлены указанные случаи.

Так, при просмотре таблицы с невязками пространственного контроля основных метеорологических элементов на станциях Починок и Сосново СевЗапгидромета в августе 1983 г. было установлено, что невязки интерполяции относительной влажности воздуха превышают критерий достоверности и составляют соответственно 4,4 и 5 %. Климатические нормы на контролируемых станциях, климатические нормы и исходные данные на влияющих станциях сомнения не вызывали. При сопоставлении средних месячных значений на станциях Починок и Сосново с соседними станциями было выявлено нарушение методики производства наблюдений, нерегулярно производилось смачивание батиста.

Было также установлено, что наблюдения за влажностью на ст.Опочка СевЗапгидромета в 1983 г. проводились по неисправному гигрометру. Так, невязка интерполяции относительной влажности воздуха ст.Опочка в течение четырех месяцев (январь-апрель) 1983 г. превышала критерии достоверности и составляли соответственно -3,7; -3,7; -7,7; -5,0 %. При этом климатические нормы и исходные данные на влияющих станциях и климатические нормы на контролируемой станции не вызвали сомнения; сопоставление средних месячных значений относительной влажности воздуха на ст.Опочка и влияющих станциях показало, что за рассматриваемый период относительная влажность воздуха на ст.Опочка на 3-9 % больше, чем на окружающих. Разности между средними месячными значениями относительной влажности воздуха и климатическими нормами на ст.Опочка возрастают от января к апрелю при почти неизменных разностях на влияющих станциях. Эти обстоятельства позволили установить причину сомнительности данных измерений относительной влажности воздуха на ст.Опочка, которая заключается в неисправности гигрометра, возникшей из-за постепенного растяжения волоса и потери чувствительности прибора. Растяжение началось зимой и усилилось в весенний период при резкой смене температуры воздуха.

Таким образом, на основании анализа результатов критического контроля данных наблюдений за влажностью воздуха с помощью ЭВМ можно сделать вывод о том, что невязки, превышающие принятые критерии достоверности, в основном обусловлены неудовлетворительным выбором влияющих (или их отсутствием), отсутствием норм (или несоответствием их современному местоположению станции) из-за того, что станция либо недавно открыта, либо изменилось ее местоположение.

Чтобы получить представление о том, как число случаев с большими невязками интерполяции влажности воздуха распределяется по сезонам, была вычислена повторяемость (%) для четырех месяцев.

В табл.2 приведена повторяемость случаев невязок, превышающих критерии достоверности. По данным таблицы можно сказать, что наибольшая повторяемость отмечается в июле в южных районах территории СССР (Укргидромет, Приволжскгидромет): по парциальному давлению водяного пара составляет 5-10 %, а по относительной влажности воздуха - 3-6 %. Такие значения повторяемостей обусловлены нарушением режима смачивания (не производится дополнительное смачивание) при производстве наблюдений в сухую и жаркую погоду (температура воздуха выше 20 °С, относительная влажность менее 70 %). В остальные месяцы повторяемость незначительна для всех

Таблица 2

Повторяемость (%) невязок интерполяции при критическом контроле характеристик влажности воздуха (парциальное давление водяного пара, относительная влажность воздуха), превышающих критерии достоверности

Гидромет	Парциальное давление водяного пара, гПа				Относительная влажность воздуха, %			
	I	IV	УП	X	I	IV	УП	X
Северо-Западное					2	2	I	
Украинское	I	3	5	I	I	3	2	2
Приволжское		4	10	I	7	5	6	5
Уральское		I	I			I	I	

четырёх управлений по гидрометеорологии как для парциального давления водяного пара (I-4 %), так и для относительной влажности воздуха (I-5 %).

Опыт проведения критического контроля с помощью ЭВМ данных наблюдений за влажностью воздуха Северо-Западного, Украинского, Приволжского и Уральского управлений по гидрометеорологии позволяет сделать следующие выводы.

Повышение эффективности критического контроля может быть достигнуто за счет:

- более тщательного подбора влияющих станций. Подбор влияющих станций необходимо производить с учетом физико-географических особенностей их местоположения, равномерности распределения вокруг контролируемой станции;
- использования в качестве "влияющих" станций соседнего управления по гидрометеорологии в случаях, когда отсутствуют влияющие в рассматриваемом управлении по гидрометеорологии;
- использования вместо норм средних многолетних, полученных за 10-15 лет /1/, при отсутствии норм (или их несоответствии современному местоположению);
- обеспечения проведения на станциях более тщательного контроля за производством и обработкой наблюдений за влажностью воздуха.

Список литературы

1. Беспалов Д.П., Грибова Т.П., Школяр Л.Ф. Результаты контроля материалов наблюдений за влажностью воздуха на территории Средней Азии // Труды ГГО. - 1977. - Вып.396. - С.77-81.

2. Методические основы автоматизированной системы метеорологических наблюдений / Под ред. Д.П.Беспалова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1971. - 120 с.

3. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981. - С.18-19.

4. Школяр Л.Ф. Некоторые особенности проведения критического контроля данных влажности воздуха с помощью ЭВМ // Математическая проверка и исправление данных гидрометеорологических наблюдений: [Сб.] / ВНИИГМИ-МЦД. - М.: Гидрометеоиздат, 1975. - С.111-113.

Т.П.Грибова

О ВОССТАНОВЛЕНИИ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ
НА ГЛУБИНАХ ПОД ЕСТЕСТВЕННЫМ ПОКРОВОМ
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ КОНТРОЛЕ ИНФОРМАЦИИ

В обеспечении непрерывности рядов наблюдений большую роль играет восстановление пропущенных и забракованных значений метеорологических величин как срочных, так и средних месячных. Восстановление было и остается важной задачей этапа обработки и контроля режимной метеорологической информации.

При ручном критическом контроле проверка надежности наблюдений за температурой почвы на глубинах под естественным покровом основывалась на использовании графического метода либо на анализе хода градиентов температуры почвы /3/.

Графический метод, с одной стороны, прост и нагляден, с другой — зависит в значительной степени от опыта специалиста и его субъективизма. Если по графику распределения с глубиной средней месячной температуры почвы устанавливалось, что информация ошибочна, браковались ежедневные результаты наблюдений на соответствующей глубине, выборки экстремальных значений и среднее месячное значение температуры. Из желания сохранить информацию отклонения от плавной кривой распределения порядка $0,5^{\circ}\text{C}$ могли не учитываться, а сравнение кривых распределения по группе станций проводилось не всегда. Таким образом, среднее месячное значение температуры почвы или утрачивалось, или сохранялось искаженным. Поскольку среднее месячное значение не вычисляется в случае неполного ряда наблюдений за месяц, при наличии перерывов в наблюдениях заполнение пропусков разрешалось выполнять путем интерполяции по ежедневным данным. Известно, что для больших глубин, начиная с 80 см, интерполяция не представляет особых трудностей, благодаря незначительным изменениям температуры почвы от одного дня к другому. На малых глубинах, вследствие значительных колебаний температуры, интерполяция затруднительна.

Среднее месячное значение температуры почвы отмечалось как сомнительное в том случае, если оно заметно отличалось от соответствующих данных соседних глубин или от данных соседних станций.

В условиях автоматизированной обработки для результатов наблюдений за температурой почвы на глубинах под естественным покровом задача восстановления средних месячных, максимальных и мини-

мальных значений решается параллельно с задачей контроля в программе пространственного межстанционного критического контроля. Контролю подвергается вертикальное распределение температуры почвы по глубинам, основу которого составляет сопоставление фактического и аппроксимированного профилей температуры почвы /2/. Надежность или сомнительность проконтролированных значений устанавливается программой на основании сравнения невязок температуры почвы на каждой из глубин с критерием достоверности $0,2^{\circ}\text{C}$. Если в результате контроля в профиле температуры почвы оказывается хотя бы одна невязка, превышающая по абсолютному значению критерий достоверности, выполняется поиск сомнительного значения температуры. В процессе этого поиска производится вычисление аппроксимированного профиля температуры почвы. В случае когда удастся обнаружить сомнительное значение температуры почвы в фактическом профиле, аппроксимированный профиль представляет собой восстановленный профиль температуры. Он позволяет восстановить пропущенное или забракованное значение температуры почвы на одной из глубин профиля с точностью $0,2^{\circ}\text{C}$. Но окончательное решение о принятии восстановленного программой значения температуры остается за специалистом: программа только предлагает профиль или часть его /2/.

При выполнении анализа результатов автоматизированного контроля специалист определяет достоверность или сомнительность результатов наблюдений, пользуясь таблицами невязок, градиентов, восстановленных профилей и фактическим материалом наблюдений и, таким образом, располагает при анализе только числовым материалом, не имея наглядного.

В случае когда значение температуры почвы на какой-то глубине приходится браковать, предварительно необходимо убедиться в правомерности восстановленного программой профиля температуры почвы. Это связано с тем, что в процессе поиска сомнительного значения может быть исключено верное значение температуры, а по оставшимся точкам оба профиля, фактический и вычисленный, окажутся совмещенными. Таким образом, требование алгоритма будет выполнено, но восстановленный профиль не будет правомерен.

Восстановленный профиль температуры почвы должен соответствовать характерному сезонному распределению температуры почвы с глубиной /1/, иначе он ошибочен. Например, известно, что зимой температура почвы с увеличением глубины растет. Наблюдается так называемый тип излучения. И если при контроле информации наблюдений за январь получен восстановленный профиль со следующими значениями: $-12,3$; $-8,3$; $-7,9$; $-7,9$; $-8,2$; $-7,7$; $-6,5^{\circ}\text{C}$, он не мо-

жет быть принят, поскольку не дает ожидаемого характерного для холодного периода года закономерного плавного роста температуры почвы с глубиной. В приведенном примере нарушение в распределении температуры с глубиной прослеживается явно на самих значениях температуры почвы и не требуется вычислять, например, градиенты для подтверждения ошибки. На практике же встречаются случаи, когда только по ходу температуры почвы обнаружить нарушение в распределении температуры почвы с глубиной специалист не может. Такой пример приведен в табл. I, в которой представлены профили температуры почвы на одной из станций в зимний месяц с 1981 по 1986 г. Из них профиль температуры почвы 1986 г. восстановленный. На первый взгляд он не вызывает сомнения, поскольку является характерным для зимнего периода, хотя на самом деле неверен. Проверку профиля можно провести на основании оценки хода градиентов температуры почвы. Правильно восстановленный профиль температуры почвы должен дать верный ход градиентов, в котором градиент каждого слоя согласуется по знаку и абсолютному значению с градиентами температуры почвы этого же слоя на станциях, расположенных в аналогичных условиях (с учетом высоты площадки над уровнем моря, рельефа, экспозиции склонов, состава почвы и т.д.).

Примером согласованных градиентов температуры почвы может служить табл. 2, в которой приведены градиенты температуры почвы в летний месяц для группы станций, расположенных на равнине.

Сопоставление градиента температуры в каждом слое по группе станций-аналогов подобно сравнению наклона кривых распределения температуры почвы по глубинам на графиках. Не случайно поэтому при ручном контроле рекомендовалось наносить на один график кривые распределения температуры для группы станций.

В условиях пересеченного, сложного рельефа подобрать группу сходных станций бывает трудно или вообще невозможно. В таких ситуациях оценить правильность градиентов восстановленного профиля температуры почвы можно на основании сравнения хода градиентов температуры почвы на станции для конкретного месяца за ряд предшествующих лет. В табл. 3 для примера приведены градиенты температуры почвы одной из станций в зимний месяц за ряд лет. Если сопоставить значения градиентов в каждом слое от года к году, видно, что в слое 20-40, 80-120, 120-160 см градиенты температуры почвы за 1986 г. отличаются на порядок от значений градиентов температуры почвы предшествующих лет. Градиенты принадлежат восстановленному профилю, приведенному в табл. I, и именно сопоставление значений градиентов в этом примере позволяет установить, что вос-

Таблица 1

Ход температуры почвы на глубинах

Год	Глубина, см						
	20	40	80	120	160	240	320
1981	-15,8	-14,0	-10,5	-6,4	-3,5	-0,5	-0,3
1982	-15,6	-14,5	-11,0	-7,4	-4,6	-1,2	-0,6
1983	-16,6	-15,2	-11,2	-6,8	-3,8	-0,4	-0,4
1984	-18,1	-16,6	-12,6	-8,4	-5,0	-0,9	-0,5
1985	-15,8	-14,7	-10,7	-6,3	-	-	-0,2
1986	-14,1	-11,7	-8,6	-6,4	-4,8	-2,1	-0,3

Таблица 2

Значения градиентов температуры почвы ($^{\circ}\text{C}/20\text{ см}$)

Номер станции	Слой, см					
	20-40	40-80	80-120	120-160	160-240	240-320
1	2,1	1,6	1,1	0,9	0,4	-
2	2,0	1,4	1,1	-	0,3	-
3	2,0	1,3	1,2	0,8	0,4	0,1
4	2,1	1,3	1,0	0,7	0,5	0,3
5	2,3	1,6	1,0	0,6	0,3	-
6	2,7	1,6	1,3	0,8	0,3	0,1
7	2,0	1,6	1,2	1,0	0,7	0,2

становленный профиль температуры почвы неприемлем.

По сравнению с ручным критический автоматизированный контроль более объективен и строг. Строгость его существенно определяется заложенным в программу критерием достоверности $0,2^{\circ}\text{C}$. Поскольку критерий достоверности мал, даже незначительно превышающие его по абсолютному значению невязки ставят под сомнение контролируемый профиль, что приводит к вычислению восстановленного профиля температуры. С одной стороны, за счет малого значения критерия достоверности повышается эффективность контроля: он

Таблица 3

Значения градиентов температуры почвы ($^{\circ}\text{C}/20\text{ см}$)

Год	Слой, см					
	20-40	40-80	80-120	120-160	160-240	240-320
1981	-1,2	-1,6	-2,2	-1,7	-0,5	0,0
1982	-0,8	-0,8	-2,1	-1,7	-0,8	0,0
1983	-0,9	-2,0	-2,0	-1,5	-0,6	0,1
1984	-0,6	-1,3	-2,1	-1,9	-0,7	0,0
1985	-0,9	-1,8	-2,1	-1,7	-0,7	-
1986	-2,4	-1,6	-1,1	-0,3	-0,7	0,1

позволяет улавливать "зарождающиеся" систематические ошибки. С другой стороны, значения восстановленной температуры почвы в аппроксимированном профиле могут отличаться от значений температуры фактического профиля всего на $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$, поэтому принимать их нужно не всегда, даже если восстановленный профиль правомерен. Подробный анализ результатов автоматизированного контроля материалов наблюдений за ряд лет для различных географических районов позволил сформулировать ряд положений, которыми должен руководствоваться специалист как при оценке надежности результатов наблюдений, так и при восстановлении значений температуры почвы /2/. Так, фактическое значение температуры почвы на глубине не исправляется, если восстановленное значение температуры почвы отличается от фактического не более чем на $0,5^{\circ}\text{C}$ и ход градиентов температуры согласуется с ходом градиентов температуры почвы станций-аналогов. Невязки при этом могут превышать критерий достоверности в 2-3 раза.

Температура почвы на глубине должна быть исправлена, если поправка, т.е. разность фактического и восстановленного значений температуры почвы превышает $0,5^{\circ}\text{C}$ и градиенты температуры почвы подтверждают ошибку. Вычисленные значения температуры почвы на соседних глубинах по отношению к рассматриваемой глубине отличаются в этом случае от фактических значений температуры обычно не больше чем на $0,2^{\circ}\text{C}$.

Восстановление температуры не допускается, если на соседней, выше- или нижележащей глубине отсутствует фактическое значение

температуры почвы.

Автоматизированный контроль особенно эффективно позволяет восстанавливать значения температуры почвы в летний и зимний периоды года, когда сформирован устойчивый характерный для сезона профиль. Так, в Узгидромете в июне 1975 г. из 17 проконтролированных станций 10 отмечены программой в качестве сомнительных. Из них на 8 обнаружен брак, и значения температуры почвы на них могут быть восстановлены по аппроксимированным профилям; 2 станции дают сомнительную информацию, которая в последующие месяцы переходит в явный брак. Все отмеченные программой случаи брака подтверждены.

Из 52 проконтролированных станций Уралгидромета в июле 1983 г. на 13 станциях отмечен брак на отдельных глубинах в профилях температуры почвы, из них на 8 станциях температура может быть восстановлена по результатам контроля.

В переходные месяцы года /1/ аппроксимированными профилями температуры почвы следует пользоваться осторожно, так как часто за ошибочное программой признается значение температуры почвы на той глубине, где происходит переход от одного типа распределения температуры почвы к другому /2/. В это время основную помощь специалисту при анализе материала оказывают градиенты температуры почвы.

В случае когда восстановить программным путем значение температуры почвы на заданной глубине не удастся, можно воспользоваться линейным уравнением регрессии значений температуры почвы двух соседних уровней измерения

$$y = ax + b.$$

Предиктором всегда можно считать значение температуры почвы нижележащего уровня из двух выбранных, предиктантом — температуру почвы верхнего уровня. Например, для уровней 20 и 40 см x — всегда температура почвы на глубине 40 см, y — температура почвы на глубине 20 см. Для вычисления коэффициентов a , b уравнения линейной регрессии требуется ряд наблюдений за конкретный месяц продолжительностью не менее 15–17 лет и материал наблюдений хорошего качества.

В управлениях по гидрометеорологии отбор надежных данных можно произвести по графикам. Для этого рекомендуется на один график наносить профили температуры почвы за несколько лет, сравнивая ход и наклон кривых.

Можно провести анализ информации по градиентам, сопоставляя их значения от года к году, либо построив корреляционную зависимость значений средней месячной (максимальной или минимальной) температуры почвы двух соседних уровней измерения. С большей уверенностью можно отсеять сомнительные данные, получив корреляционный график и вычислив градиенты либо графики корреляционной зависимости и профили температуры почвы.

Возможность использования уравнений линейной регрессии для восстановления температуры почвы на одной из глубин профиля была проверена на нескольких станциях Забайкалгидромета. Станции выбирались произвольно. Для вычислений использовалась информация наблюдений за 1970–1986 гг. для зимних и летних месяцев. Коэффициенты корреляции получились равными 0,67–0,88. Точность восстановления температуры почвы по уравнению регрессии колебалась от 0,2 до 0,5 °C на различных станциях. Средняя квадратическая ошибка составила 0,1–0,6 °C. Предварительные расчеты дали вполне приемлемые результаты, однако метод требует дополнительной проверки, особенно в переходные месяцы года и не только для станций Забайкальского региона, но также и для других климатических зон и географических условий.

Список литературы

1. Беспалов Д.П., Грибова Т.П. Об анализе результатов критического контроля месячных выводов по температуре почвы на глубинах // Труды ИГО. – 1981. – Вып. 449. – С. 31–40.
2. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. – Л.: Гидрометеозидат, 1981. – С. 9–10, 28–29, 42–54.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. 2, вып. 3. – Л.: Гидрометеозидат, 1969. – С. 85–91.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. 1, вып. 3. – Л.: Гидрометеозидат, 1985. – С. 221–225.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОСРЕДНЕННЫХ ПО ПЛОЩАДИ ВЕЛИЧИН ПРИ КОНТРОЛЕ РЕЖИМНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных вопросам пространственного осреднения метеорологических величин, не существует утвержденной методики расчета средних по площади административных районов, областей и союзных республик метеорологических величин для включения их в Справочник. Подавляющее большинство предложенных решений этой задачи требует наличия информации о статистической структуре и исходит из предположений, не всегда оправдывающихся на практике. Используется и большое количество приемов, по существу являющихся различными вариантами метода среднего взвешенного. Детальный анализ достоинств и недостатков различных подходов к осреднению метеорологических полей дан в известной монографии Р.Л.Кагана /4/.

Основную трудность при сопоставлении оценок точности различных способов осреднения гидрометеорологических величин представляет отсутствие эталона.

Приведенные в /4/ формулы позволяют в принципе при задании характеристик статистической структуры полей метеорологических величин определить точность среднего, полученного для любой области осреднения при произвольном расположении пунктов измерений. Однако при их практическом использовании мы сразу же сталкиваемся с тем обстоятельством, что такие оценки верны в той мере, в какой используемые для их получения характеристики статистической структуры отражают фактическую изменчивость в пространстве рассматриваемых величин. Попытка детализации характеристик статистической структуры, как указывалось в /4/, неизбежно уменьшает объем исходных для расчета данных, а следовательно, достоверность (надежность) результатов.

Другой не менее важной проблемой при таком подходе является отсутствие достаточно обеспеченных сведений о статистической структуре для многих регионов Советского Союза. Более того, мы нередко не располагаем и достаточным числом реализаций соответствующих величин во всех пунктах, по которым осуществляется осреднение.

По указанным причинам наиболее распространенным методом оценки точности пространственного осреднения является сопоставление средних значений, полученных по густой и произвольно разре-

женной сети пунктов наблюдений. При этом обычно полагают, что результаты наблюдений каждой станции могут быть распространены на некоторую окружающую территорию, тем большую, чем более климатически однородна окружающая территория в отношении рассматриваемой величины. Иначе говоря, на практике обычно принимают, что среднее по площади значение метеорологической величины может быть заменено данными измерений в некоторой точке на рассматриваемой территории. Так, в работе /3/ на основании формализации представления о зоне, освещаемой наблюдениями в пунктах сети, расположенных в пределах области осреднения, показано, что оценка территориального среднего зависит главным образом от взаимного расположения пунктов и мало чувствительна к изменениям форм области осреднения.

Аналогичный результат получен и в работе /1/, где оценка средних для территории значений величин осуществлялась также без учета статистических характеристик структуры полей. При выборе методики осреднения по площади на основании данных стандартных измерений, проводимых в условиях фиксированной, зачастую климатически неоднородной территории и заданного набора станций, приходится исходить не только из соображений точности способа осреднения, но в значительной мере и из возможностей его практического использования. Важным критерием при этом является удобство и эффективность реализации методики.

В указанном смысле определенных преимуществ перед другими методами осреднения можно добиться, если взять за основу для расчета осредненных значений методику пространственного контроля режимной метеорологической информации, более 10 лет выполняемого в оперативном порядке во всех РВЦ. В соответствии с /5/ при таком контроле поле контролируемой величины $u = f(x, y)$ в окрестности каждой станции аппроксимируется полиномом первой степени от координат x и y

$$u = f(x, y) = Ax + By + C. \quad (I)$$

Как было показано в /1/, при линейной аппроксимации поля в окрестности станции по данным ее ближайшего окружения средняя по площади круга величина $\bar{u}_i$ равна значению аппроксимирующего многочлена в его центре. Иначе говоря, для центра тяжести элементарной площадки S_i , имеющей форму круга или не слишком асимметричного многоугольника, справедливо соотношение

$$\bar{u}_i = C \quad (2)$$

В связи с тем что порядок системы, которую приходится решать для каждой элементарной площадки S_i , невысок, среднее значение полинома u_s для территории S , состоящей из элементарных площадок S_i , может быть определено по формуле

$$\bar{u}_s = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n s_i \bar{u}_i \quad (3)$$

Весовые множители p_i для каждой элементарной площадки S_i могут быть выбраны пропорциональными ее площади, т.е. определяются выражением

$$p_i = s_i / S \quad (4)$$

В результате формула (3) приобретает вид

$$\bar{u}_s = \sum_{i=1}^n p_i u_i \quad (5)$$

Если при этом выполнить условие нормировки весов, т.е. потребовать, чтобы

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (6)$$

можно уменьшить относительную погрешность определения средней за счет некоторой взаимной компенсации погрешностей определения весов. Для рассматриваемой задачи это обстоятельство имеет немаловажное значение, так как приходится вычислять средние значения и для контуров сложной формы, какими являются территории административных районов.

Чтобы определить наиболее рациональный способ оценки средних значений u по каждой элементарной площадке S_i (многоугольнику), на которые разбивается контур S , а также среднего значения u_s по всему контуру S , был выполнен ряд расчетов указанных величин при различном выборе опорных станций для аппроксимации поля.

С этой целью на территории БССР было выбрано девять многоугольников таким образом, чтобы центр тяжести каждого из них по возможности совпал с центром окружности, проходящей через выбранные опорные станции контура S (рис.1). Как следует из /1/, при

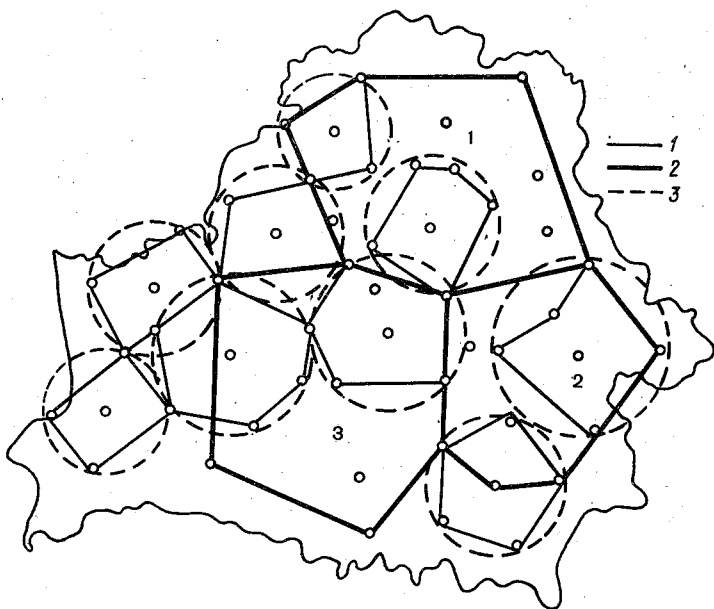


Рис.1. Схема расположения многоугольников для оценки точности осреднения на территории БССР.

1 - многоугольники, вписанные в окружности; 2 - большие многоугольники; 3 - окружности, центром которых являются контролируемые станции.

соблюдении указанного условия погрешность получения среднего по площади значения для каждого такого многоугольника определяется точностью, с которой интерполированное значение в центре его тяжести характеризует наблюдаемое в этой точке значение. Это обстоятельство позволяет осуществить оценку ошибок осреднения применительно к многоугольникам, представленным на рис.1. Результаты ее, выполненные по данным за 36 месяцев, приводятся в табл.1.

Сопоставление полученных оценок с приведенными в /4/ указывает на их хорошее согласование. Они также подтверждают тот известный факт, что зависимость оценок среднего для элементарных площадок небольших размеров от их формы (в рассматриваемом случае для окружности и многоугольника) является слабой.

Для оценки погрешностей, которые может дать предлагаемая ме-

Таблица 1

Средние квадратические ошибки определения средней температуры и среднего слоя осадков (БССР)

Средние значения	Температура, °C	Осадки, мм
Декадные	0,2	8,3
Месячные	0,1	7,3

Таблица 2

Средние квадратические ошибки определения средней температуры и среднего слоя осадков

Номер многоугольника	Число пунктов	Температура, °C	Осадки, мм
Белгидромет			
1	18	0,1	2,5
2	13	0,1	1,9
3	15	0,1	5,7
Забайкалгидромет			
1	50	0,3	7,9
2	38	0,1	5,7

тодика осреднения при определении среднего по контуру S , включающему n элементарных площадок, воспользуемся, как это обычно принято делать, в качестве "эталона" средним арифметическим из значений, наблюдаемых на всех станциях, входящих в контур осреднения S . Отклонение от этого эталона среднего значения, полученного по некоторому меньшему числу станций, будем условно считать ошибкой осреднения.

Иначе говоря, будем характеризовать точность осреднения дисперсией ошибок, полученных при различных вариантах разрежения сети станций. Критерием целесообразности осреднения предлагаемым методом условимся считать его точность, оцениваемую дисперсией ошибки. С этой целью выберем на территории Белгидромета три больших многоугольника так, чтобы их вершины совпали со станциями ос-

новой сети, а стороны соприкасались. Для каждого из них оценим средние предлагаемым методом по данным в вершинах выбранных многоугольников (1, 2 и 3 на рис.1), что равносильно разрежению сети приблизительно в 3 раза.

Как следует из табл.2, где приведены оценки осреднения по такой "разреженной" сети, предложенная методика обеспечивает необходимую точность получения средних.

Аналогичные результаты для Забайкалгидромета, где осреднение производилось по двум многоугольникам значительно большей площади (табл.2), также подтверждают возможность получения необходимых для включения в ежемесячник средних по площади значений температуры и слоя осадков.

Поскольку нашей задачей является наиболее точное определение средней величины, целесообразно разделение контура на элементарные площадки производить таким образом, чтобы все станции сети оказались опорными для аппроксимации с помощью полинома (1), а элементарные площадки S_i не перекрывали друг друга.

Исходя из этого соображения и учитывая полученные результаты, весь контур S , соответствующий территории БССР, был разбит на ряд неперекрывающихся многоугольников таким образом, чтобы станции УГКС располагались только в вершинах последних. Таких многоугольников оказалось 29 (рис.2).

В отличие от метода квадратов, широко используемого в практике осреднения, такой способ разбиения площади осреднения на элементарные площадки можно считать практически однозначным при любой густоте сети. Для стабильной сети указанная выше процедура выполняется один раз, равно как и определение координат центра тяжести выделенных элементарных площадок S_i , а также определение весовых множителей.

Все последующие расчеты ЭВМ производит в рамках программы /5/, в соответствии с которой осуществляется интерполяция значений на центр тяжести каждой элементарной площадки (многоугольника). Эти значения принимаются за частное среднее $\bar{u}_i$ по соответствующей элементарной площадке S_i и с заранее определенным весом p_i используются при последующем арифметическом осреднении для получения средней $\bar{u}_s$ по всей рассматриваемой территории.

Такой способ осреднения позволяет учесть горизонтальный градиент поля рассматриваемой величины, который имеет место даже для такой сравнительно однородной территории, как БССР.

Таким образом, предлагаемый метод представляет собой один из вариантов метода полигонов с той разницей, что за элементарную

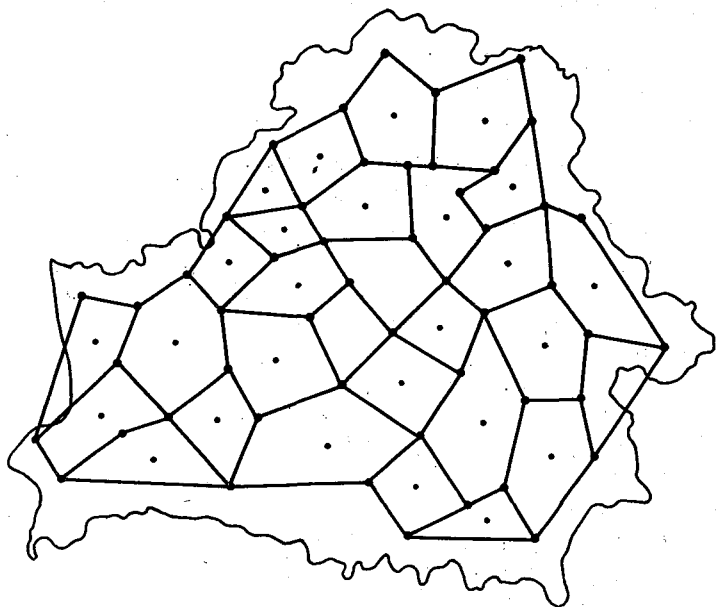


Рис.2. Схема разбиения территории БССР для получения оредних по площади величин.

площадку (элемент осреднения) выбрана не окрестность пункта наблюдения, а площадь многоугольника, образованная 4-6 соседними пунктами наблюдений. Расчет среднего значения для центра тяжести каждой такой элементарной площадки сводится к интегрированию полинома /4/, коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов по значениям рассматриваемой величины в вершинах многоугольника. Последующее арифметическое осреднение частных средних дает среднее по территории.

Немаловажным достоинством предлагаемого метода является тот факт, что полиномы малых порядков практически нечувствительны к ошибкам в исходных данных.

Предлагаемый метод является в настоящее время и наиболее экономичным, так как средние по площади величины могут быть получены в процессе выполнения контроля режимной метеорологической информации. При этом если учитывать еще и зависимость осредняемых величин от местных условий, т.е. осреднять не непосредственно на-

блюдаемые величины, а их отклонения от нормы, можно ожидать, что точность осреднения будет выше приведенных в настоящей работе оценок.

Список литературы

1. Беспалов Д.П., Грибова Т.П., Светлова Т.П. Методика получения характеристик полей средних месячных значений основных метеорологических элементов // Труды ГГО. - 1972. - Вып.280. - С.39-46.

2. Голубев В.С., Зотимов Н.В., Зыков Н.А. Некоторые результаты исследования жидких осадков в районе Валдайской возвышенности // Труды ГИ. - 1965. - Вып.123. - С.5-17.

3. Гусев С.А., Медведев М.Ю., Румянцев В.А. О выборе рациональных схем размещения сети при пространственном осреднении гидрометеорологических полей // Метеорология и гидрология. - 1982. - № 7. - С.51-57.

4. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. - Л.: Гидрометеоиздат, 1979. - 214 с.

5. Методические указания по проведению критического контроля результатов метеорологических наблюдений на сети станций. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981.

И.В.Колотовкин, В.В.Осипова,
Е.А.Федорова

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ М-107

Информация автоматических радиометеорологических станций (АРМС) М-107, работающих в труднодоступных и малообжитых районах СССР, при использовании ее с данными сети обычных наземных метеорологических станций является ценным дополнительным материалом для получения характеристик метеорологического режима.

В настоящее время совместное использование данных АРМС и обычных станций в значительной степени затруднено, так как обработка обычной метеорологической информации производится с помощью ЭВМ в региональных вычислительных центрах (РВЦ), а информация АРМС до сих пор обрабатывается в отделах метеорологии территориальных ГМЦ вручную /1, 3/. Ручной способ обработки информации из-за его низкой производительности приводит к тому, что месячные выводы по измерениям АРМС, как правило, не могут быть своевременно опубликованы в метеорологических ежемесячниках вместе с данными обычных станций.

Повысить эффективность использования информации АРМС можно, если для ее обработки воспользоваться комплексом программ, разработанных для системы режимной обработки данных обычных станций, включив данные АРМС в общий поток информации. Однако использование существующего комплекса программы осложняется тем, что для информации АРМС характерно большее число пропущенных данных (пропусков измерения), чем допускается программами для обработки информации обычных станций. Кроме того, первичная информация АРМС представляет собой закодированные радиограммы и для обработки на ЭВМ ее необходимо преобразовать в физические единицы измерения, т.е. сделать аналогичной информации обычных станций. Эти особенности информации АРМС, а также небольшой ее объем по сравнению с информацией обычных станций (радиограмма АРМС за один срок содержит менее 5 % соответствующей информации обычной станции) позволили сделать вывод о необходимости разработки специальных программ, что было осуществлено в Новосибирском РВЦ для ЭВМ системы ЕС.

В разработанном комплексе программ предусмотрено преобразование первичных данных, содержащихся в радиограммах АРМС, к виду, удобному для режимной обработки и получения месячных таблиц, ко-

торные содержат данные измерений АРМС за каждый срок, а также средние суточные и месячные значения метеорологических характеристик. При вычислении суточных и месячных значений метеорологических величин применяется в основном методика обработки данных обычных наземных станций, что весьма важно для получения сопоставимых характеристик /4/. Однако наличие большого числа пропусков в данных АРМС из-за непредвиденных перерывов различной продолжительности в работе станции, а также из-за трудностей приема радиogramм вызвало необходимость уточнения методики обработки /5/.

На основании исследования зависимости точности средних метеорологических характеристик от временной их изменчивости были определены требования к необходимому числу наблюдений за различные периоды осреднения /2/. В соответствии с этими требованиями средние суточные значения температуры воздуха, скорости ветра и атмосферного давления вычисляются по значениям за все 8 сроков в течение суток, а при наличии пропусков в течение суток - за 4 срока при интервале между сроками 6 ч. В случае когда в течение суток пропущено 2 срока подряд и интервал между полученными значениями больше 6 ч, средние суточные значения не вычисляются. Количество осадков и экстремальные значения метеорологических величин при пропусках наблюдений вообще не вычисляются.

Для оценки качества, точности и сопоставимости с данными обычных станций данные АРМС должны быть тщательно проконтролированы. Однако методы пространственного контроля, разработанные применительно к информации обычных станций, малоэффективны для контроля большинства метеорологических величин (температура воздуха, количество осадков, характеристики ветра) из-за большого удаления АРМС от других станций, а также из-за особенностей их физико-географического положения.

Для контроля атмосферного давления можно было бы подобрать "влияющие" станции, расположенные на расстоянии до 200 км, однако осуществление контроля невозможно, так как для большинства АРМС отсутствуют сведения о высоте над уровнем моря. Невозможен и контроль данных АРМС с помощью уравнений связи по соседним станциям из-за недостаточности ряда наблюдений АРМС. В связи с этим на данном этапе для оценки качества данных АРМС пришлось ограничиться использованием внутростанционного контроля, при котором выявляются только грубые ошибки измерения в условиях необслуживаемой автоматической станции, а также случайные ошибки, допущенные радистом при приеме радиogramм.

При разработке алгоритмов внутростанционного контроля данных

Таблица I

Пределные значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$)
для территории Мурманскгидромета и Севергидромета

Температура воздуха	Месяц										
	I, II, XII	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Максимальная $T_{\max}$	10	20	30	35	40	40	40	35	25	25	
Минимальная $T_{\min}$	-60	-55	-45	-35	-20	-15	-10	-20	-40	-40	
Суточная амплитуда A_T	15	20	20	20	15	20	20	15	10	10	
Изменение за 3 ч ΔT	7	10	10	10	7	7	7	5	5	7	

АРМС были уточнены предельные значения климатологических характеристик. По данным обычных станций, расположенных в районах, где установлены АРМС, получены максимальные и минимальные значения за сутки, значения суточной амплитуды и изменения за 3 ч температуры воздуха (табл. I).

В процессе автоматизированного контроля значения метеорологических величин за каждый срок измерений сравниваются с предельными климатологическими значениями данной величины, записанными в паспорте АРМС, и сопоставляются между собой в соответствии с принятыми условиями (алгоритмами).

Значение температуры воздуха за контролируемый срок (T_i) считается верным, если выполняются следующие условия:

1. $T_i - T_{\min} \geq 0$,
2. $T_{\max} - T_i \geq 0$,
3. $T_i - T_{i-1} \leq \Delta T$,
4. $T_i - T_y \leq A_T$,
5. $T_x - T_i \leq A_T$,
6. $T_x - T_y \leq A_T$.

Обозначения, принятые в формулах, соответствуют обозначениям в табл. I; T_x (T_y) – максимальная (минимальная) температура воздуха за конкретные сутки из 8 сроков измерения.

Если указанные выше условия не соблюдаются, то контролируе-

мое значение требует дополнительного анализа ("выдается на сомнение").

Как показал опыт, наиболее распространенной ошибкой в информации АРМС является повторение одинаковых значений в нескольких сводках (радиограммах) подряд, что связано с техническим несовершенством датчиков станции.

Для выявления этих ошибок значения за контролируемый срок сопоставляются со значениями в соседние сроки измерения; при равенстве значений в три срока подряд (контролируемый, предыдущий и последующий или контролируемый и два последующих) контролируемое значение "выдается на сомнение". Алгоритмы для проверки этого условия для температуры воздуха имеют вид:

если $T_i = T_{i-1} = T_{i+1}$, то T_i - брак;

если $T_i = T_{i-1} = T_{i-2}$, то T_i - брак.

Аналогичные алгоритмы приняты для контроля значений и других метеорологических величин.

Для скорости ветра в качестве максимального предельно возможного значения принят предел измерения скорости ветра датчиком (40 м/с), а для направления ветра - реально возможные значения направления от 0 до 360°.

Значение, не удовлетворяющее условиям, указанным в алгоритмах, признается сомнительным и печатается в таблице "Логические ошибки АРМС" с указанием даты, срока измерения и номера алгоритма, по которому выдается ошибка. Кроме того, для удобства дальнейшего анализа в таблице печатаются сомнительное контролируемое значение и значения, с которыми контролируемое сравнивается в соответствии с алгоритмом.

Окончательное решение о достоверности может быть принято специалистом только после дополнительного анализа с привлечением данных ближайших станций.

В табл.2 приведены результаты контроля температуры воздуха по АРМС Лавка Камчатскгидромета за июль 1983 г., полученные в Новосибирском РВЦ.

При контроле данных АРМС Лавка использовались следующие постоянные характеристики:

$$\Delta T = 15^\circ\text{C}, A_T = 15^\circ\text{C}, \Delta P = 15 \text{ гПа}.$$

Дополнительный анализ суточного хода температуры воздуха за 17 июля позволил признать неверными значения 8,1 °C за срок 18 ч и 14,6 °C за срок 3 ч. Резкие колебания температуры, большие чем среднеклиматические значения (ΔT и A_T), не подтверждаются данными ближайших станций и синоптической обстановкой в этом

Таблица 2

Логические ошибки АРМС Лавка. 17 июля

Срок, ч	Алгоритм контроля	Значение метеорологической величины	
		контролируемое	составляемое
Температура воздуха			
18	$T_x - T_i \leq A_T$	8,1	25,6
21	$T_i - T_{i-1} \leq \Delta T$	20,1	8,1
00	$T_i - T_y \leq A_T$	25,6	8,1
12	$T_x - T_y \leq A_T$	25,6	8,1
03	$T_i - T_{i-1} \leq \Delta T$	14,6	25,6
06	$T_i - T_{i-1} \leq \Delta T$	25,1	14,6
09	$T_i - T_y \leq A_T$	23,1	8,1

районе за данные сутки.

Все измеренные значения АРМС в течение месяца, а также месячные выводы выдаются ЭВМ в виде таблицы ТММ-АР "Метеорологические наблюдения АРМС". При этом для получения суточных и месячных выводов используются все имеющиеся срочные значения, в том числе выданные на сомнение и забракованные в дальнейшем. При большом количестве забракованных значений месячные и суточные выводы следует вычислять заново.

Это, безусловно, является недостатком настоящего комплекса программ обработки данных АРМС. Авторы умышленно остановились на такой схеме контроля и обработки до усовершенствования алгоритмов контроля и уточнения критериев контроля, принятых в настоящем комплексе на основании наблюдений обычных станций, физико-географические условия которых в ряде случаев значительно отличаются от условий АРМС.

Испытание комплекса программ автоматизированной обработки информации АРМС было проведено на материале сети АРМС Камчатско-гидромета. Опытная эксплуатация комплекса программ в течение 1983-1984 гг. позволяет сделать следующие выводы.

Переход к автоматизированной обработке данных АРМС обеспечивает быстрое и качественное получение табличного материала (таблица ТММ-АР) с результатами измерений и логического контроля, что позволяет использовать проверенные данные измерений АРМС для

обобщения в информационно-справочных изданиях, для накопления на долговременных технических носителях и для последующего включения в Гидрометфонд СССР.

Устранение отдельных недостатков и дальнейшее совершенствование методов машинного контроля станет возможным лишь после внедрения комплекса программ обработки на всей сети АРМС и получения достаточного материала для разработки более детальных рекомендаций по проведению анализа результатов контроля.

Список литературы

1. Временные методические указания по обработке наблюдений автоматических радиометеорологических станций. - Обнинск, 1974. - 20 с.

2. Грошева Л.А., Федорова Е.А. О вычислении средних месячных значений метеорологических элементов при пропусках наблюдений // Труды ГГО. - 1983. - Вып.473. - С.53-58.

3. Методические указания по машинной обработке и контролю данных гидрометеорологических наблюдений. Ч.1, вып.3, разд.1. - М.: Гидрометеиздат, 1983. - 79 с.

4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ч.2, вып.3. - Л.: Гидрометеиздат, 1969.

5. Федорова Е.А. Особенности обработки данных автоматических радиометеорологических станций АРМС М-107 // Труды ГГО. - 1986. - Вып.493. - С.49-55.

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ПРИВЕДЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

В последние десятилетия отмечалась значительная интенсификация международного обмена оперативной гидрометеорологической информацией. Значительно возрос объем данных, поступающих в национальные и региональные центры обработки. Сбор информации производится с обширных территорий, которые зачастую превосходят по площади не только отдельные государства, но и целые материки. Международный код для передачи оперативной гидрометеорологической информации /1/ предусматривает передачу двух групп данных по атмосферному давлению (p). Первая из них (третья группа кода) содержит сведения о давлении на уровне станции (p_s), вторая (четвертая группа кода) представляет либо давление на уровне моря (p_c), либо высоту соответствующей изобарической поверхности. Третья группа не передается при наличии информации в четвертой группе. Следует отметить, что для современных прогностических схем давление на уровне моря не входит в число обязательных исходных данных.

При расчете высот изобарических поверхностей для больших регионов, производимом по полям p_0 , могут возникнуть рассогласования на границах государств в связи с тем, что значения p_0 получены в разных странах по различным методикам приведения давления к уровню моря. В случае изменения существующей практики и перехода к преимущественному сбору информации о давлении на станциях проблема сопоставимости методов приведения атмосферного давления сохранит свою актуальность, так как процедура приведения p к тому или иному уровню либо определение высот изобарических поверхностей используется практически во всех прогностических схемах. В связи с этим остается открытым вопрос о возможных расхождениях в значениях приведенного давления, обусловленных различиями в методах приведения p .

Сведения о методах такого рода, применяемых в различных странах, представлены в обзоре /4/, подготовленном ВМО и являющемся, согласно действующему Руководству ВМО по метеорологическим приборам и методам наблюдений /3/, наиболее полным обобщением методов приведения атмосферного давления, применяемых в международной практике.

Рассмотрим основные разновидности барометрической формулы,

на которых базируются различные методы приведения давления. Основное внимание при этом уделено предположениям и допущениям, принимаемым при выводе выражений, используемых на практике.

Исходным соотношением для получения всех без исключения формул, представленных в обзоре /4/, является уравнение статики атмосферы

$$\partial p / \partial z = -\rho g, \quad (I)$$

где p - атмосферное давление, ρ - плотность воздуха, g - ускорение свободного падения. Интегрирование уравнения (I) для случая влажной атмосферы приводит к следующему соотношению между давлением p_z на уровне z и давлением p_c на уровне z_0 , принятом за начало отсчета z :

$$\ln \frac{p_c}{p} = \frac{1}{R_a} \int_{z_0}^z \frac{g(z) dz}{T_v(z)}, \quad (2)$$

где R_a - газовая постоянная сухого воздуха, T_v - виртуальная температура, $T_v = T (1 + 0,378 \frac{e}{p})$, e - парциальное давление водяного пара.

Для практического применения соотношения (2) делается ряд упрощающих предположений относительно вида зависимостей $g(z)$, $T(z)$ и $e(z)$ в пределах столба атмосферы (фиктивного или реального), для которого осуществляется приведение p . Именно видом принятых допущений определяются различия в значениях приведенного давления.

Использование предположения: $g = \text{const}$, $T_v(z) = T_v(z_0) - \gamma(z - z_0)$ - такой подход к упрощению соотношения (2) принят в СССР /2/ и Венгрии - позволяет получить следующую формулу приведения:

$$\frac{p_a}{p} = \left[1 + \frac{\gamma(z - z_0)}{T_v(z)} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma R_a}} \quad (3)$$

Второй подход к модификации формулы (2) рассмотрим на примере соотношения для связи p с p_0 , основанного на введении понятия средней температуры слоя $[z, z_0]$ и приближенной замене интеграла в правой части (2) произведением

$$\int_{z_0}^z \frac{g(z) dz}{T_v(z)} \approx \frac{g_0}{T_m} \int_{z_0}^z \left[1 - \frac{z(z-z_0)}{R} \right] dz. \quad (4)$$

При этом принимается

$$T_m = [T(z_0) + T(z)]/2,$$

$$g = g_0 R^2 / [R^2 + (z-z_0)^2] \approx g_0 [1 - 2(z-z_0)/R],$$

где R - радиус Земли. Поправка на влажность вводится непосредственно в расчетное значение T_m . В некоторых странах для этого используется величина e на уровне измерения давления (e_s), в большинстве же стран, применяющих рассмотренную процедуру упрощения формулы приведения p , пользуются априорно заданными зависимостями $e(z)$.

Перейдя к десятичным логарифмам, выразив T_m в градусах Цельсия: $T_m = t_m + 273,16$ и выполнив интегрирование в правой части (4), можно получить окончательный вид формулы приведения:

$$\lg \frac{p_0}{p} = \frac{z - z_0}{18,429 + 67,53 t_m + 0,003(z - z_0)}, \quad (5)$$

применяемой в таком виде во Франции, Алжире, Камбодже, Эфиопии, Лаосе, Марокко, Судане, Таиланде, Тунисе, Вьетнаме, Кении, Танзании, Уганде. Следует отметить, что хотя в формуле (5) под T_m понимают среднюю температуру слоя $[z_0, z]$, при выводе (5) предполагалось лишь, что T_m лежит в промежутке $[T(z_0), T(z)]$. Указанное обстоятельство является дополнительным свидетельством приближенного характера соотношений (4) и (5). Поскольку значение $T(z)$, используемое для расчета T_m , в подавляющем большинстве случаев неизвестно, его получают, исходя из предположения о линейном падении T с высотой, причем значения градиента $\gamma = -\partial T / \partial z$ принимаются различными в разных странах. Чаще всего используются следующие значения: 0,005; 0,006; 0,0065; 0,01 К/м.

К третьему типу наиболее распространенных формул приведения давления следует отнести родственное (5) соотношение, базирующееся на переходе от шкалы геометрических высот к значениям гипсометрической высоты H :

$$H - H_0 = \frac{1}{g_0} \int_{z_0}^z g(z) dz, \quad (6)$$

Используя шкалу H , а также принимая допущения, аналогичные допущениям, рассмотренным при выводе формулы (5), приходим к следующей формуле приведения p :

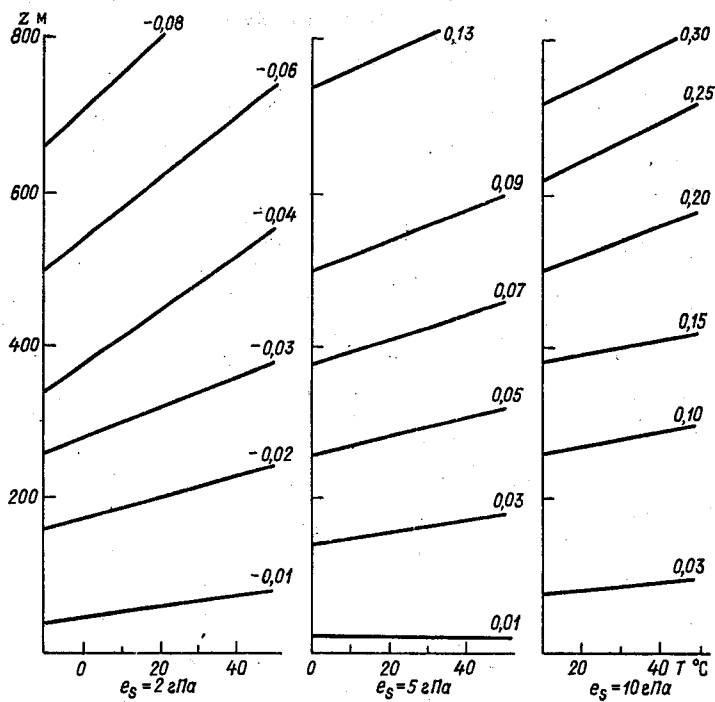
$$\lg(p_0/p) = kH/T_m, \quad (7)$$

в которой k - так называемая гипсометрическая постоянная, являющаяся комбинацией известных констант. В таком виде формула приведения рекомендована ВМО для использования в международной оперативной практике. При расчете T_m предлагается задавать $\gamma = 0,0065$ К/м, а поправку на влажность вводить в соответствии с за tabулированной зависимостью $e(z)$, приведенной в обзоре /4/. Но даже при наличии рекомендованного, строго определенного вида формулы приведения, в разных странах, применяющих соотношение (7), имеются различия в трактовке особенностей его практического использования. Так, в ряде стран (США, Сирия, Швеция, Бразилия, Сальвадор, Доминиканская Республика, Конго, Иордания) при расчете температурного профиля учитываются суточный ход и локальные особенности поля температуры в данной местности. Значение температуры воздуха на станции заменяется комбинацией

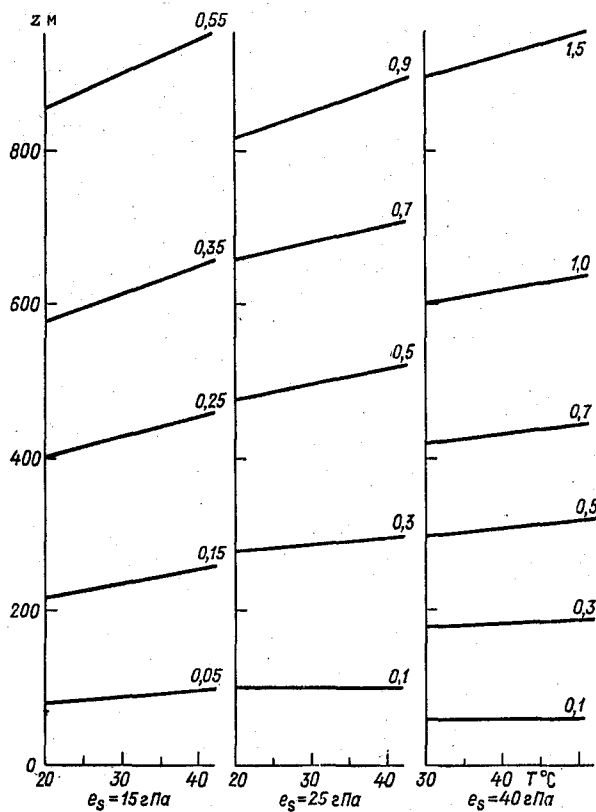
$$T = \frac{T_s + T_{12}}{2} + F(T),$$

где T_s - температура воздуха на станции в срок наблюдений; T_{12} - температура воздуха в срок, на 12 ч предшествующий рассматриваемому; $F(T)$ - некоторая функция, подбираемая, исходя из местных условий. Таким образом, при значительном суточном ходе T_s на станции в значения приведенного p вносится некоторая поправка, значение которой в общем случае определить невозможно из-за неопределенности задания функции $F(T)$.

С целью оценки различий, возникающих в значениях p_0 при использовании рассмотренных выше формул приведения, нами были выполнены расчеты разностей поправок к давлению: $\delta p = \Delta p_i - \Delta p_k$, где $i, k = 1, 2, 3$ - номера способов приведения для широкого диапазона значений температуры T_s и парциального давления водяного пара e_s на станции при изменениях высоты приведения в диапазоне от 0 до 1000 м. Под поправками Δp понимаются значения



Изолинии δ_p при разных значениях e_s



Изолинии δ_p при разных значениях l_s .

p , которые необходимо добавить к измеренному на уровне z давлению, чтобы получить значения давления на уровне $z_0 = 0$. Значения T_s изменялись от -40 до $+40$ °C, парциального давления водяного пара — от 2 до 45 гПа. Величины γ принимались равными: 0,005; 0,006; 0,0065; 0,01 К/м.

Как и следовало ожидать, вследствие структурного сходства формул (5) и (7), при одинаковых значениях T_s (без учета суточного хода и вида функции F), e_s , γ и z разница в поправках, полученных по формулам (5) и (7), весьма незначительна и для рассмотренных диапазонов изменений определяющих параметров не превосходит 0,3 гПа.

Разности δp между поправками, полученными по формулам (7) и (3), могут достигать больших значений. Наглядное представление о том, как значения этих разностей меняются с ростом e_s , можно получить из распределений $\delta p(e_s, T_s, z)$, приведенных на рисунке. В этих расчетах значение было принято $\gamma = 0,0065$ К/м, $p = 1000$ гПа. Наибольшие относительные изменения δp наблюдаются при малых значениях e_s , с ростом e_s разности δp увеличиваются, а степень их зависимости от значений T_s уменьшается. При малых e_s разности δp отрицательны, однако уже при $e_s = 5$ гПа они меняют знак, и дальнейший рост δp происходит в положительной области, достигая при больших z и e_s значений 1–2 гПа.

Давление на станции, как следует из рассмотренных выше формул приведения (3), (5), (7), сказывается на значениях поправок Δp двояко. Во-первых, значение p входит в окончательное значение поправки Δp в виде множителя; во-вторых, от величины p зависит поправка к температуре на влажность. Действие второго из указанных факторов невелико ввиду малости отношения e_s/p .

Разности между поправками, полученными по одинаковым формулам с разными значениями входных параметров, находятся, как показали расчеты, в пределах 0,5 гПа. Такого уровня могут, в частности, достигать расхождения в поправках, обусловленные различиями в задании функции F (таблицы значений $F(T)$ для некоторых стран приведены в обзоре /4/). Расхождения, возникающие за счет различной точности округления констант, входящих в формулы, достигают значений примерно 0,3 гПа. Влияние выбора того или иного значения градиента γ сказывается только на больших z . Из вида всех рассмотренных формул приведения следует, что вариации γ в пределах 0,005–0,01 К/м эквивалентны изменениям T_s порядка единиц градусов и менее. Выполненные нами оценки зависимости $\Delta p(T_s)$ для каждой формулы приведения показали, что расхождения в величинах

Δp , вызванные такими изменениями T_s , не превосходят сотых долей гектопаскаля даже при больших z .

Обобщенный анализ полученных нами результатов позволяет утверждать, что при использовании различных формул приведения давления к заданному уровню, применяемых в международной оперативной практике, значение максимально возможных расхождений в Δp при высоте приведения менее 1000 м превосходит 2-2,5 гПа. В условиях умеренных широт, при небольшой влажности и невысокой температуре воздуха расхождения составляют около 1 гПа.

Список литературы

1. Код для передачи данных гидрометеорологических наблюдений с наземных и морских наблюдательных станций КН-01. - Л.: Гидрометеоиздат, 1981. - 72 с.

2. Методические указания по приведению атмосферного давления к уровню моря и вычислению высот изобарических поверхностей на метеорологических станциях. - Л.: Гидрометеоиздат, 1979. - 48 с.

3. Guide to meteorological instruments and methods of observation. - Fifth edition, WMO. - 1983. - N 8.

4. Methods on use for the reduction of atmospheric pressure. - WMO, Techn. Note. - 1968. - N 91. - 22 p.

Б.М.Ильин, Е.Е.Федорович,
Е.Н.Чурина

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ ПО ДАННЫМ СРОЧНЫХ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Задача эмпирико-статистического исследования современного климата, являющаяся составной частью более широкой проблемы климатического мониторинга /2/, требует разработки новых методов систематизации и анализа информации о состоянии климатической системы. Качество этой информации во многом зависит от рационального построения и технического оснащения поставляющих ее наблюдательных систем. Уровень развития средств обработки данных наблюдений, достигнутый к настоящему времени, позволяет в ряде случаев компенсировать имеющиеся недостатки наблюдательных систем путем комплексирования различных видов информации, совершенствования схем обработки и применения математических моделей для решения задач усвоения информационных полей. Такого рода компенсация является необходимой, например, в тех случаях, когда требуется привлечь для климатологического обобщения данные наблюдений за прошлые годы и десятилетия - именно такой диапазон временных масштабов представляет интерес для задач мониторинга климата /2, 3/. Это связано с тем, что системы наблюдений на протяжении указанных интервалов времени перестраиваются: изменяется состав данных наблюдений, их сроки, единицы измерений, размещение и приборное оснащение станций.

Подобную перестройку можно проследить на примере сети станций, ведущих актинометрические наблюдения. Большинство этих станций со времени организационного оформления актинометрической сети (1952-1957 гг.) осуществляют срочные (6 сроков) измерения составляющих радиационного баланса. Помимо этих наблюдений на ограниченном (и переменном) числе станций проводилась и проводится непрерывная регистрация всех или части составляющих радиационного баланса с помощью самопишущих приборов различных типов. Данные регистрации представляют особую ценность для климатологических обобщений ввиду возможности получения на их основе с большой точностью характеристик суточного хода, а также суточных, месячных и годовых сумм составляющих радиационного баланса. Знание этих характеристик требуется для решения ряда прикладных задач, в частности для обоснования размещения гелиоэнергетических установок

/5, 6/. Данные срочных наблюдений, являющиеся эпизодическими по своей сути, можно использовать для расчета указанных климатических характеристик составляющих радиационного баланса лишь при условии разработки специальных методов восстановления их суточного хода /8, 9/.

Одной из важнейших составляющих радиационного баланса является суммарная радиация Q . На ее примере кратко рассмотрим основные методы восстановления суточного хода радиационных характеристик.

Первым в историческом плане методом восстановления суточного хода Q была его аппроксимация ломаной линией с последующим расчетом сумм радиации методом трапеций /9/. Развитием этого подхода можно считать методику, предусматривающую графическое соединение ординат точек наблюдения в суточном ходе плавной кривой, определение значений Q в серединах часовых интервалов и расчет интегральных характеристик умножением полученных значений на длину часового интервала с последующим суммированием. Параллельно с разработкой упомянутых методов проводились исследования сопоставимости климатических характеристик Q , рассчитанных по данным срочных наблюдений и данным регистрирующих приборов, для разных широтных зон и условий облачности. В результате этих исследований были получены таблицы поправочных коэффициентов для уточнения сумм радиации, рассчитанных по данным срочных наблюдений /8/.

Рассмотренные методы позволили значительно пополнить сведения о климатических характеристиках солнечной радиации на территории СССР. При расчете сумм (или осреднении) Q за большие промежутки времени (год и более) восстановленные по данным срочных наблюдений распределения значений Q в суточном ходе отличались от рассчитанных по данным регистрации не более чем на 3-5 % /8/. Однако уже при получении на основе данных срочных наблюдений месячных сумм и месячных ежечасных сумм Q погрешности расчетов увеличивались, снижая обоснованность рассчитываемых климатических характеристик. Дополнительным недостатком рассмотренных методов является отсутствие единой вычислительной схемы восстановления суточного хода, приспособленной для массовых расчетов на ЭВМ. Исходя из этого, целью авторов настоящей работы была разработка универсального алгоритма восстановления суточного хода и расчета месячных сумм Q , позволяющего свести к минимуму элементы субъективизма при расчете этих характеристик по данным срочных наблюдений для разных физико-географических и погодных условий. Сформулированная общая задача, в соответствии с областью приложения

результатов ее решения, может быть разделена на три частные:

1) задача расчета месячных и годовых сумм Q по средним месячным срочным значениям суммарной радиации,

2) задача восстановления суточного хода (дневного распределения часовых сумм) и расчета суточных сумм Q по данным срочных наблюдений конкретного дня,

3) задача восстановления месячных и годовых ежечасных сумм Q по средним месячным срочным значениям суммарной радиации.

В основу разработанного метода была положена аппроксимация суточного хода суммарной радиации естественным кубическим сплайном /4/:

$$Q_i(t) = xq_i + (1-x)q_{i-1} + \Delta t_{i-1} \times \\ \times [(k_{i-1} - d_i)x(1-x)^2 - (k_i - d_i)(1-x)x^2], \quad (I)$$

где $x = (t - t_{i-1}) / \Delta t_{i-1}$; $\Delta t_{i-1} = t_i - t_{i-1}$; $d_i = (q_i - q_{i-1}) / \Delta t_{i-1}$; q_i - данные срочных наблюдений; $k_i, i = 1, \dots, N$ - коэффициенты сплайна; t_1 - точка восхода Солнца, t_N - точка захода Солнца, $t_i, i = 2, \dots, N-1$ - точки сроков наблюдений.

По определению естественный кубический сплайн удовлетворяет следующим условиям:

$$Q_i(t_i) = Q_{i-1}(t_i), \quad (2.1)$$

$$Q'_i(t_i) = Q'_{i-1}(t_i), \quad (2.2)$$

$$Q''_i(t_i) = Q''_{i-1}(t_i), \quad (2.3)$$

$$Q''_1(t_1) = Q''_{N-1}(t_N) = 0. \quad (2.4)$$

Для построения сплайна использовался стандартный метод, основанный на численном решении системы линейных уравнений с трехдиагональной матрицей /1/. Интегральные характеристики (суммы) радиации рассчитывались по сплайну тремя способами. В первом из них использовалось непосредственное интегрирование аналитического выражения сплайна (I):

$$S_I = \sum_{i=1}^{N-1} S_{II} \quad ,$$

$$S_{II} = \frac{\Delta t_i}{2} (q_{i+1} + q_i) + \frac{\Delta t_i^2}{12} (\dot{k}_{i+1} - \dot{k}_i) \quad (3)$$

Второй способ представлял собой реализацию приближенного метода прямоугольников:

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{N_h} S'_{hi}, \quad S'_{hi} = Q_{hi} \Delta t_{hi} \quad (4)$$

где Q_{hi} — рассчитанные по сплайну значения Q в серединах часовых интервалов, Δt_{hi} — часовые интервалы, N_h — число этих интервалов с момента восхода Солнца до его захода, S'_{hi} — оценка часовой суммы за i -й час.

Третий способ позволял рассчитывать часовые суммы по аппроксимационной формуле (I) с помощью взятых аналитически интегралов:

$$S_{III} = \sum_{i=1}^{N_h} S''_{hi}, \quad S''_{hi} = \int_{t_{hi}}^{t_{hi+1}} Q_i(t) dt \quad (5)$$

Основываясь на явном выражении для $Q_i(t)$ (I), были получены формулы, связывающие S''_{hi} с параметрами сплайна k_i , Δt_i , d_i , которые использовались при расчетах. Последние два из приведенных соотношений позволяют рассчитывать как параметры суточного хода, так и суточные суммы Q . Формула (3) предназначена только для расчета суточных сумм. Наглядное представление о всех трех способах расчета интегральных характеристик Q можно получить из схемы, представленной на рисунке.

Для сравнения производилась также аппроксимация суточного хода Q ломаной линией и расчет суточных сумм по формуле трапеций:

$$S_T = \sum_{i=1}^{N-1} S_{ti}, \quad S_{ti} = \frac{\Delta t_i}{2} (q_{i+1} + q_i) \quad (6)$$

Моменты времени восхода и захода Солнца, отвечающие нулевым значениям сплайна, рассчитывались по географическим координатам станции, а также по коэффициентам разложения в ряд Фурье склонения Солнца и поправки к местному солнечному времени. При расчете месячных ежечасных сумм по средним месячным срочным значениям Q

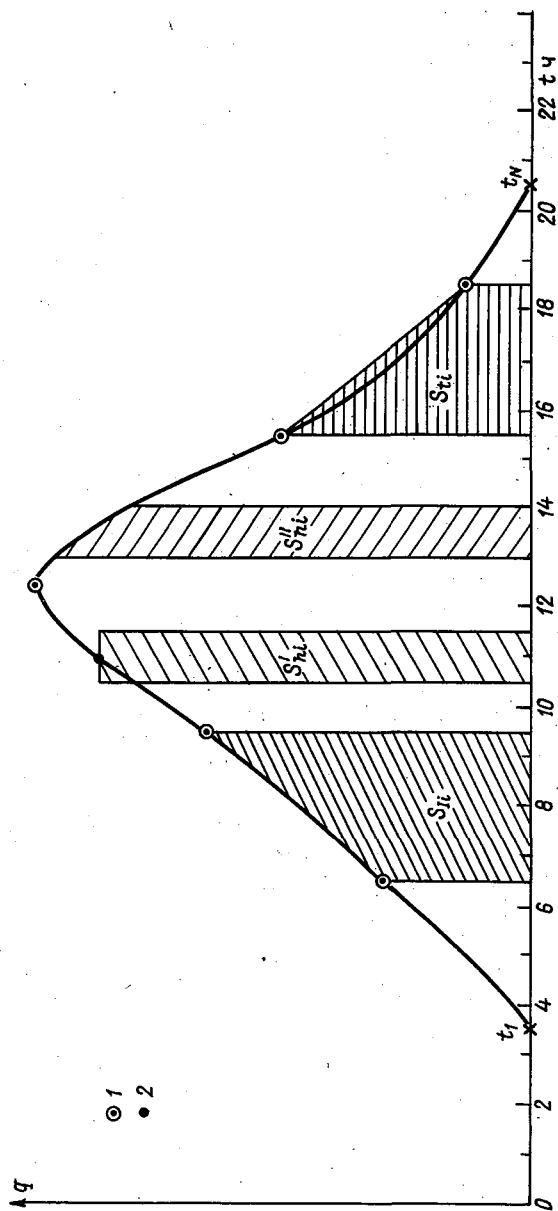


Схема восстановления суточного хода и расчета интегральных характеристик Q по данным срочных наблюдений различными способами.

I - срочки наблюдений, 2 - восстановленное значение Q в середине часового интервала. Способы обозначены в соответствии с (3)-(6).

Таблица I

Характеристики относительных погрешностей восстановления суточных сумм Q по ежедневным срочным данным.
Ст. Москва, март 1983 г.

Способ восстановления	$\bar{\delta}$	$\bar{\delta}_a$	σ_{δ}	σ_{δ_a}
S_T	-0,121	0,153	0,169	0,140
S_I	-0,0528	0,112	0,159	0,123
S_{II}	-0,0536	0,112	0,159	0,123
S_{III}	-0,0421	0,115	0,154	0,124

сроки восхода и захода Солнца определялись для 15-го числа месяца.

В качестве исходной информации для восстановления суточного хода Q использовались данные срочных наблюдений, содержащиеся в Актинометрическом ежемесячнике, часть I. Рассчитанные распределения часовых сумм Q в суточном ходе, а также суточные, месячные и годовые суммы радиации сопоставлялись с результатами расчетов этих характеристик по данным станций, на которых осуществляется параллельная со срочными наблюдениями регистрация Q самопишущими приборами. Данные регистрации также приводятся в Ежемесячнике.

На примере месячного массива срочных значений Q (ст. Москва, март 1983 г.) рассмотрим результаты применения разработанного метода для расчета суточных сумм радиации за конкретные дни, определение месячных и месячных ежечасных сумм Q . В табл. I представлены оценки относительных погрешностей расчета суточных сумм различными способами. Характеристиками погрешностей служат их средние значения $\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$, средние значения абсолютных величин $\bar{\delta}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i|$ и оценки среднего квадратического отклонения ошибок от средних:

$$\sigma_{\delta} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\delta_a} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (|\delta_i| - \bar{\delta}_a)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где $\delta_i = 1 - S_{ai}/S_{zi}$, $\bar{n}$ — объем выборки, S_{ai} — результат расчета i -й суточной суммы по аппроксимационной формуле, S_{zi} — то же по данным регистрации. Сопоставление различных способов расчета S_{ai} показывает, что использование аппроксимации суточного хода Q сплайн-функциями позволяет в данном случае почти в 1,5 раза уменьшить величину $\bar{\delta}_a$ по сравнению с погрешностью, получаемой при аппроксимации суточного хода ломаной линией. Уменьшаются также оценки средних квадратических отклонений ошибок от средних как для δ_i , так и для $|\delta_i|$. К числу дополнительных достоинств разработанного метода следует отнести уменьшение систематической составляющей погрешности расчета суточных сумм, о чем можно судить по малым значениям $\bar{\delta}$, полученным в результате применения сплайн-аппроксимации. При этом различные способы построения аппроксимаций по сплайнам дают, как видно из приведенных в таблице данных, близкие результаты.

Результаты расчета месячных ежечасных сумм, полученные для того же массива данных, представлены в табл.2. Оценки средних относительных погрешностей расчета, помещенные в последнем столбце таблицы, свидетельствуют о том, что предлагаемый метод позволяет получить в целом приемлемую погрешность расчета ежечасных сумм, сравнимую с предельной погрешностью расчета месячных сумм радиации по сетевым наблюдениям /8/. Наименее точно восстанавливаются суммы в ранние утренние и поздние вечерние часы, относительная погрешность расчета этих сумм достигает 25–30 %. Различия в суммах, полученных с помощью разных способов сплайн-аппроксимации, невелики. В дневные часы они не превосходят 1–2 %, однако в первые часы после восхода Солнца и непосредственно перед его заходом эти различия становятся ощутимыми. Следует, однако, заметить, что при малых высотах Солнца, отвечающих указанным часовым интервалам, точность измерения потоков радиации невысока, полученные различия находятся в пределах погрешности расчетов сумм по данным регистрации. Восстановление ежечасных сумм по осредненным данным срочных наблюдений для рассмотренного массива данных является, как видно из представленных в таблице результатов, более точным, чем восстановление сумм по ежедневным срочным данным.

Результаты апробации разработанного метода расчета сумм Q на материале ежедневных наблюдений послужили основой для его опытного применения к расчету средних месячных и годовых сумм Q по многолетним рядам срочных наблюдений.

Дополнительный интерес при этом представляли оценки различий между суммами, рассчитанными по данным срочных наблюдений и по

Таблица 2

Месячные ежекасные суммы Q (МДж/м^2), восстановленные различными способами.
 Ст. Москва, март 1983 г.
 (ΣR - месячные ежекасные суммы, рассчитанные по данным регистрации Q)

Способ восста- новления	Интервал, ч												$\bar{\delta}_a$
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
ΣR	2,13	9,43	20,72	32,00	40,62	41,55	39,21	36,54	29,96	19,66	9,38	2,27	-
По осредненным за месяц данным срочных наблюдений													
δ_{II}	1,77	9,89	19,78	29,25	36,31	40,09	39,84	35,45	28,26	19,88	11,47	2,76	3,1
δ_{III}	2,21	9,97	19,76	29,14	36,18	39,92	39,66	35,33	28,21	19,88	11,47	3,20	3,0
По ежедневным данным срочных наблюдений													
δ_{II}	1,29	12,89	21,45	28,92	34,44	37,44	37,24	33,66	27,44	19,61	11,35	1,46	5,8
δ_{III}	2,34	12,18	21,38	28,84	34,34	37,30	37,09	33,52	27,37	19,58	10,87	2,30	5,8

данным регистрации для разных климатических зон. Исходными данными для расчетов служили осредненные за месяц данные десятилетних (1976–1985 гг.) срочных наблюдений Q на станциях Москва, Ташкент, Верхнее Дуброво (Средний Урал), Семипалатинск (Северо-Восточный Казахстан), Оленёк (Северная Якутия). На всех этих станциях в указанные годы срочные наблюдения за суммарной радиацией проводились параллельно с ее регистрацией.

По существующим климатическим оценкам /8/, ряды наблюдений такой длины являются статистически обоснованными для оценки климатических характеристик Q . Сравнительный анализ оценок норм месячных сумм Q , рассчитанных различными способами, можно провести, воспользовавшись данными расчетов, представленными в табл.3. Обращает на себя внимание систематическое занижение оценок норм, полученных методом трапеции в зимние месяцы, и завышение таких же оценок в летний период. Эта особенность слабее выражена для норм ст.Оленёк, погрешности расчета которых по срочным данным всеми способами больше, чем для норм на других станциях.

Можно также заметить, что все способы сплайн-аппроксимации суточного хода дают заниженные значения норм в зимние месяцы. Относительное значение этого занижения для всех станций, за исключением ст.Оленёк, не выходит за пределы 5 %. В целом же погрешности расчета месячных сумм по сплайнам имеют несистематический характер, что подтверждается также высокой точностью (в пределах 1–2 %) полученных с использованием сплайн-аппроксимации годовых сумм для всех рассмотренных станций. Существенных закономерностей в распределениях средних квадратических отклонений месячных сумм σ_3 , как видно из результатов расчетов, приведенных в табл.4, не наблюдается. Следует лишь отметить, что при расчете этой характеристики распределений месячных сумм Q преимущества сплайн-аппроксимации проявляются не столь отчетливо, как при расчете норм. Так, для ст.Ташкент метод трапеций дает, по крайней мере, не худшие результаты, чем использование сплайнов. Средние квадратические отклонения месячных сумм для ст.Оленёк рассчитываются с высокими погрешностями как по сплайнам, так и методом трапеции. Сплайн-аппроксимация позволила более точно по сравнению с методом трапеций оценить величины σ_3 только для ст.Москва.

Статистическая обработка относительных погрешностей восстановления месячных сумм Q по данным срочных наблюдений рассмотренных пяти станций позволила оценить средние значения этих погрешностей, а также характеристики их отклонений от средних значений. Сопоставление статистических характеристик, полученных для

Таблица 3

Оценки норм месячных сумм Q (МДж/м²), полученные различными способами. 1976–1985 гг.

Станция	Способ расчета месяч- ных сумм	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Москва	S_R	60	134	260	376	535	571	549	455	259	128	49	37
	S_I	57	137	262	361	534	597	567	459	256	128	49	36
	S_{II}	57	136	262	355	536	599	568	459	260	129	44	35
	S_T	48	114	252	344	494	635	604	436	245	99	39	29
Верхнее Дубово	S_R	73	158	343	454	596	623	594	455	284	156	83	50
	S_I	70	156	344	447	596	647	603	449	286	153	81	49
	S_{II}	69	156	344	440	598	648	606	448	289	155	74	52
	S_T	58	129	329	425	551	686	645	423	273	115	65	40
Семипа- латинск	S_R	91	179	379	482	599	689	640	509	333	172	95	63
	S_I	85	178	378	476	588	669	633	504	321	162	87	57
	S_{II}	85	178	372	470	589	672	637	510	326	165	80	56
	S_T	72	148	355	455	545	712	676	477	307	122	69	50
Оленёк	S_R	8	49	217	430	579	583	561	389	185	83	13	0
	S_I	2	62	219	435	617	588	573	396	197	81	18	0
	S_{II}	3	61	218	435	610	588	573	396	188	80	12	0
	S_T	0,6	49	206	407	544	607	593	365	176	64	8	0
Ташкент	S_R	204	270	401	546	736	825	850	755	588	373	220	170
	S_I	200	273	396	541	723	835	844	773	594	372	222	162
	S_{II}	199	277	396	536	710	855	871	773	599	369	222	162
	S_T	169	220	380	520	686	902	920	741	568	354	171	129

различных способов восстановления суточного хода, можно произвес-
ти на основе данных расчетов, приведенных в табл.5. Можно заме-
тить, что для станций, расположенных в умеренных широтах, сплайн-
аппроксимация позволяет значительно уменьшить погрешности восста-
новления месячных сумм Q по сравнению с методом трапеций. Так,
средние значения ошибок δ_c при применении метода трапеций пре-

Таблица 4

Средние квадратические отклонения σ_s (МДж/м²) месячных сумм Q от норм, полученные различными способами. 1976-1985 гг.

Станция	Способ расчета месяч- ных сумм	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Москва	S_R	8	22	42	41	96	73	70	44	45	21	13	9
	S_I	9	20	45	43	97	81	76	40	48	22	12	9
	S_{II}	9	20	45	43	97	81	76	40	49	23	12	9
	S_T	7	16	43	41	91	86	79	37	46	16	9	8
Верхнее Дуброво	S_R	8	15	34	33	43	48	84	51	52	23	7	6
	S_I	7	12	36	39	31	36	70	50	58	28	5	6
	S_{II}	7	12	36	38	31	36	69	50	59	28	5	7
	S_T	6	10	34	37	30	37	72	48	55	21	4	5
Семипа- латинск	S_R	6	15	36	71	49	71	49	59	30	23	15	8
	S_I	6	14	36	68	40	109	60	75	26	23	15	5
	S_{II}	6	14	36	68	40	109	60	76	26	24	14	5
	S_T	5	11	35	65	36	113	61	71	25	19	13	4
Оленёк	S_R	12	7	18	33	102	110	76	87	36	7	2	0
	S_I	0,8	43	40	37	53	116	61	65	21	12	8	0
	S_{II}	1	42	40	37	53	116	61	65	19	12	4	0
	S_T	0,2	27	38	34	47	120	65	60	19	7	3	0
Ташкент	S_R	20	29	44	74	59	41	49	22	20	42	26	20
	S_I	22	39	41	81	58	40	41	24	19	43	29	23
	S_{II}	22	40	41	81	58	40	40	24	19	43	29	22
	S_T	32	32	40	79	56	43	43	22	19	41	23	18

восходят значения ошибок сплайн-аппроксимации в 2-3 раза и более, а значения σ_{S_R} и σ_{S_T} для сумм S_T больше значений средних квадратических отклонений для сумм S_I и S_{II} в 1,5-2 раза. Небольшие, по сравнению с методом трапеций, значения δ , относящиеся к способам S_I и S_{II} , свидетельствуют о малости систематических отклонений сумм, рассчитанных по сплайнам, от их значений,

Таблица 5

Статистические характеристики погрешностей восстановления
 месячных сумм Q по данным срочных наблюдений
 за десятилетний период

Станция	Способ расчета месячных сумм	$\bar{\delta}_a$	σ_{δ_a}	$\bar{\delta}$	σ_{δ}
Москва	S_I	0,040	0,030	0,001	0,050
	S_{II}	0,048	0,037	-0,008	0,059
	S_T	0,122	0,075	-0,085	0,115
Верхнее Дубово	S_I	0,037	0,028	-0,008	0,046
	S_{II}	0,042	0,035	-0,009	0,054
	S_T	0,130	0,084	-0,098	0,120
Семипалатинск	S_I	0,057	0,049	-0,036	0,066
	S_{II}	0,064	0,057	-0,041	0,075
	S_T	0,142	0,096	-0,119	0,122
Оленёк	S_I	0,181	0,282	0,033	0,333
	S_{II}	0,182	0,235	0,001	0,269
	S_T	0,209	0,252	-0,144	0,295
Ташкент	S_I	0,028	0,031	-0,058	0,041
	S_{II}	0,033	0,032	-0,029	0,046
	S_T	0,107	0,085	-0,079	0,111

полученных по данным регистрации. Знак оценки $\bar{\delta}$ для случая S_T показывает, что метод трапеций в целом занижает значения месячных сумм Q для всех рассмотренных станций.

Выводы

I. Применение онлайн-аппроксимаций для восстановления среднего месячного суточного хода Q по данным срочных наблюдений позволяет понизить уровень относительных погрешностей расчета месячных сумм Q до значений 3-7 %. При расчете по срочным данным годовых сумм методы онлайн-аппроксимации дают результаты, практи-

чески совпадающие с результатами расчетов сумм Q по данным регистрации.

2. Для станций, расположенных в умеренных широтах, аппроксимация суточного хода сплайном значительно повышает точность оценок норм месячных сумм Q по сравнению с применяемым в настоящее время для этих целей методом трапеций.

3. Суточные суммы Q за конкретные дни рассчитываются на основе разработанного метода со средней относительной погрешностью 10-12 %, что вполне приемлемо для ряда прикладных задач.

4. Предложенный метод сплайн-аппроксимации суточного хода Q обеспечивает достаточно высокую точность ($\bar{\delta}_a$ в пределах 5-7 %) восстановления распределений месячных и годовых ежечасных сумм Q , что делает его перспективным, в частности, для решения задач климатологического обеспечения гелиоэнергетических проектов.

Список литературы

1. Волков Е.А. Численные методы. - М.: Наука, 1982.
2. Груза Г.В. Мониторинг современного климата как эмпирико-статистическая основа долгосрочных прогнозов погоды // Труды ВНИИГМИ-МЦД. - 1986. - Вып.129.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха северного полушария. - Л.: Гидрометеиздат, 1980.
4. Завьялов Ю.С., Квасов В.И., Мирошников В.А. Методы сплайн-функций. - М.: Наука, 1980.
5. Кобышева Н.В., Копанев И.Д. Основные принципы ведения "Кадастра по климату СССР" // Труды ГГО. - 1981. - Вып.460.
6. Копанев И.Д. Об основных результатах и перспективе развития исследований по прикладной климатологии // Труды ГГО. - 1984. - Вып.485.
7. Пивоварова З.И. О временной структуре рядов сумм солнечной радиации разного масштаба осреднения // Труды ГГО. - 1974. - Вып.307.
8. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1977.
9. Руководство по контролю актинометрических наблюдений. - Л.: Гидрометеиздат, 1962.

Г.П. Резников

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГИГРОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМЫХ МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРОВ (ФОРМУЛЫ)

Роль прецизионных измерений величин, характеризующих влажность воздуха, не ограничивается в настоящее время задачами, возникающими на уровне эталонов этих величин. В практике определения точностных характеристик рабочих средств измерений влажности (особенно входящих в состав информационно-измерительных систем), при исследовании физических процессов, связанных с образованием туманов и облаков, прецизионные измерения определяют успех решения задач. Погрешность измерений обуславливается инструментальной составляющей погрешности непосредственно измеряемых величин и погрешностью обработки. Последняя, в свою очередь, зависит от выбора вида зависимостей, точности входящих в них констант и выбранного алгоритма вычислений. Расширение круга задач, связанных с прецизионными измерениями, побуждает применить в этих случаях широко распространенную портативную программируемую вычислительную технику. Но недостаточный объем регистровой и программной памяти накладывает ограничения на такой выбор, и он оказывается нетривиальным.

В настоящей статье и выполняется обоснованный выбор исходных физических зависимостей взаимных прецизионных пересчетов гигрометрических величин. Они ориентированы на реализацию в программах для программируемых микрокалькуляторов (ПМК). Последние являются по существу электронными клавишными вычислительными машинами с символично-кодовым программированием.

Следует отметить, что для приближенных вычислений гигрометрических величин с применением ПМК и микропроцессоров уже приведены программы в действующем нормативном документе /2/.

В процессе прецизионных вычислений решается задача пересчета значений одних гигрометрических величин (заданных) в другие (вычисляемые) с минимальной погрешностью. Выбор гигрометрических величин, участвующих в пересчетах, осуществлен с учетом степени их употребления, а также их непосредственного измерения существующими прецизионными средствами измерения влажности воздуха: точка росы T (конденсационный гигрометр), парциальное давление водяного пара e (кулонометрический), относительная влажность φ (сорбционно-электрический), а также температура смоченного термо-

Таблица 1

Автор	Коэффициент				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
А. Векслер	-6,095 $174 \cdot 10^3$	+2,116 $173 \cdot 595 \cdot 10$	-2,722 $240 \cdot 4 \cdot 10^{-2}$	+1,684 $079 \cdot 0 \cdot 10^{-5}$	+2,450 $505 \cdot 8$
Д. Зонгаг	-6,094 $464 \cdot 2 \cdot 10^3$	+2,112 $499 \cdot 52 \cdot 10$	-2,724 $555 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$	+1,685 $339 \cdot 6 \cdot 10^{-5}$	+2,457 $550 \cdot 6$

Таблица 2

Автор	τ °C				
	0	5	15	35	55
А. Векслер	6,112 13	8,724 96	17,051 81	56,264 49	157,522 73
Д. Зонгаг	6,112 18	8,724 48	17,053 35	56,266 51	157,524 32
$\sigma = \frac{E_{\text{вб}} - E_{\text{вз}}}{E_{\text{вз}}} \cdot 10^3$	-0,8	+5,5	-1	-3,6	-1

метра t^+ (психрометр).

В основу расчетов положены формулы и зависимости, нормируемые в /2/, за исключением формулы связи между давлением насыщенного водяного пара и температурой в однокомпонентной системе. Эта связь является фундаментальной для гигрометрии и уже около двух веков продолжает оставаться объектом исследований и уточнений /1, 5-8/. К настоящему моменту уже насчитывается не один десяток уравнений, аппроксимирующих эту зависимость /6/. Широко используемая при исходных измерениях формула Гоффа и Грэча, описывающая указанную зависимость, была принята рядом международных организаций, в том числе ВМО, в 1946 г. и приводится в /2/. В последующие десятилетия были выполнены исследования, позволившие повысить точность и достоверность характера зависимости между давлением насыщенного водяного пара и температурой: измерено с высокой точностью давление насыщенного водяного пара при нескольких значениях температуры в диапазоне от 0 до 90 °C, уточнены значения ряда физических констант, принята новая международная практическая температурная шкала (МПТШ-68), получены новые данные о водяном паре как реальной неконденсированной фазе воды в однокомпонентной и многокомпонентной системах (в частности, в смеси с воздухом), усовершенствованы методы аппроксимации и интерполяции. Все это позволило вначале А.Векслеру (США) предложить в 1976 г. /8/, а затем Д.Зонтагу (ГДР) в 1982 г. /3, 7/ уточнить формулу вида

$$\ln E_w(T) = c_1 T^{-1} + c_2 + c_3 T + c_4 T^2 + c_5 \ln T, \quad (I)$$

в которой E_w — давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью химически чистой воды в однокомпонентной системе, гПа; $T = \tau + T_0$, τ — температура по шкале Цельсия, $T_0 = 273,15$ К — температура плавления льда по шкале Кельвина; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 — коэффициенты, которые этими авторами оцениваются по-разному (табл.1).

Сопоставление результатов вычислений E_w по этой формуле при двух указанных наборах коэффициентов приводит к выводу о том, что разности между ними знакопеременны, но не превышают по абсолютному значению 0,006 % (табл.2).

Полученное наибольшее отклонение результатов Зонтага от результатов Векслера оказывается на порядок меньше, чем среднее квадратическое отклонение результатов вычислений по Зонтагу, оцениваемое им самим в $\pm 0,05$ % для диапазона температуры от 0 до +100 °C и в $\pm 0,28$ % для диапазона от 0 до -50 °C. Вышеизложенные

Таблица 3

$T, ^\circ\text{C}$	$E_{\text{wr}}(T/2), \text{нПа}$	$E_{\text{w3}}(T/3), \text{нПа}$	$\delta = \frac{E_{\text{w3}} - E_{\text{wr}}}{E_{\text{wr}}}, 10^{-3}\%$	$\Delta T_{\text{рк}} = T_3 - T_2, 10^{-3}^\circ\text{C}$
100	1013,251 3	1013,261 7	1,029	0,3
80	473,660 9	473,754 4	9,951	2,5
60	199,254 4	199,333 2	39,568	6,9
40	73,773 3	73,813 5	54,514	10,2
20	23,370 8	23,385 7	63,673	10,3
0	6,107 0	6,112 183	84,867	11,7
-20	1,253 8	1,256 3	201,81	23,4
-40	0,189 09	0,190 48	733,72	70,8

сведения делают понятной наблюдающуюся тенденцию к замене используемой формулы /2/ формулой Зонтага /3/ как более корректной с физической точки зрения. Для реализации же вычислений с применением ПМК она имеет принципиальное преимущество, поскольку требует намного меньше регистровой и программной памяти. Следовательно, для решения поставленной задачи необходимо отдать ей безусловное предпочтение. Но поскольку она является конкурирующей с формулой, приводимой в нормативном документе, то в интересах соблюдения принципов обеспечения единства измерений необходимо сопоставить результаты вычислений по этим двум формулам (табл.3).

Как видно из приведенных сопоставлений, отличие значений носит монотонно изменяющийся характер и увеличивается плавно по мере уменьшения температуры от 100 до 0 $^\circ\text{C}$, а при отрицательной температуре — с резко увеличивающейся скоростью. Если принять во внимание, что предел допускаемой погрешности прецизионного конденсационного гигрометра достигает 0,2 $^\circ\text{C}$, то уже при -20 $^\circ\text{C}$ неопределенность исходной зависимости отличается лишь на порядок (0,023 $^\circ\text{C}$) от указанной инструментальной погрешности. Таким образом, очевидна актуальность задачи стандартизации формулы, описывающей эту зависимость. Вместе с тем в процессе обработки результатов прецизионных измерений вплоть до эталонных в гигрометрии уже сейчас может быть использована формула Зонтага во всем диапазоне положительных значений температуры без нарушения принципов единства измерений.

В процессе прецизионных измерений и вычислений необходимо учитывать реальные свойства паровоздушной смеси, ее отличие от свойств водяного пара в однокомпонентной системе. Это должно учитываться при расчетах, на что указывается в нормативном документе /2/. Отличие выражается в том, что при одном и том же значении температуры термодинамического равновесия водяного пара и воды давление насыщенного водяного пара в однокомпонентной системе меньше, чем в многокомпонентной (например, в смеси с воздухом). Степень отличия зависит от общего давления воздуха и температуры. При одном и том же давлении наименьшее отличие отмечается примерно при 0 °С. Таким образом, кривая насыщенного водяного пара в многокомпонентной системе всегда проходит над кривой для однокомпонентной системы (т.е. для "чистого" водяного пара). Следовательно, в случае прецизионных измерений конденсационным гигрометром в воздухе может допускаться существенная ошибка принципиального характера, если значение парциального давления находить, ограничиваясь зависимостью давления насыщенного водяного пара от температуры в однокомпонентной системе, соответствующей нижней кривой, что приводит к заниженным результатам. И наоборот, если по измеренному парциальному давлению водяного пара в воздухе (например, кулонометрическим гигрометром) находить точку росы по зависимости для однокомпонентной системы, то возникает погрешность, завышающая действительное значение точки росы.

Учет отличия значения давления насыщенного водяного пара в многокомпонентной системе от значения этой величины в однокомпонентной системе осуществляется с помощью корректирующего коэффициента, который является функцией давления, температуры и состава атмосферы, т.е.

$$E_c(\tau, p) = \chi(\tau, p) E_n(\tau), \quad (2)$$

где τ — температура равновесия конденсированной и неконденсированной фаз воды; p — общее давление в системе; E_n — давление насыщенного водяного пара в однокомпонентной системе при температуре τ ; $E_c(\tau, p)$ — давление насыщенного водяного пара в многокомпонентной системе (в смеси) при температуре τ и общем давлении p .

Возвращаясь к недавно приведенным примерам, можно видеть, что корректным результатом в первом случае будет результат, полученный с применением формулы (2). Во втором случае для определения точки росы необходимо измеренное значение парциального давле-

ния разделить на корректирующий коэффициент, соответствующий приближенному значению точки росы $\tilde{\tau}$, найденному без учета χ (в приближении $E_n \approx E_c$), а по вычисленному E_n , пользуясь зависимостью $E_n(\tau)$ для однокомпонентной системы, найти действительное значение точки росы τ .

Очевидна также необходимость учета χ в случае прецизионных вычислений относительной влажности φ_c в многокомпонентной системе:

$$\varphi_c = \frac{E_c(\tau)}{E_c(t)} = \frac{E_n(\tau) \chi(\tau, p)}{E_n(t) \chi(t, p)} \quad (3)$$

в имеющихся известных источниках, в том числе и /2, 4/, значения χ представляются в табличной форме. При автоматизированных же вычислениях, особенно на ЦМК, необходимо аналитическое представление χ как функции температуры и давления. Исходя из графиков, построенных по табличным данным для χ , характеризующей паровоздушную смесь, насыщенную водяным паром относительно воды, можно подобрать следующее аналитическое выражение:

$$\chi_{\text{вв}}(\tau, p) = 1,0024 - 4 \cdot 10^{-6} (500 - p) + 5 \cdot 10^{-7} \frac{p}{900} [\tau - 0,03(900 - p)]^2. \quad (4)$$

Формула отражает характер графического отображения этой функции, при котором в качестве переменной принята температура τ плоской поверхности воды и пара в градусах Цельсия, а в качестве параметра — давление паровоздушной смеси p в гектопаскалях. Каждому значению p соответствует своя парабола в координатах (χ, p) . Все параболы смещаются вверх по мере увеличения p . Вершина параболы для $p = 500$ гПа находится на уровне $\chi = 1,0024$, что и отражается первым слагаемым. Смещение вершины парабол по ординате (χ) описывается вторым слагаемым, в котором $4 \cdot 10^{-6}$ играет роль масштабного множителя. Смещение вершин вдоль оси абсцисс (2) с изменением давления отражается частью аргумента третьего слагаемого, а именно $-0,03(900 - p)$. Третье слагаемое отражает квадратическую зависимость χ от τ при фиксированном значении p ; при этом обнаруживается, что масштабирующий множитель несколько зависит от давления и поэтому принимает вид $5 \cdot 10^{-7} \frac{p}{900}$.

Сравнение значений $\chi_{\text{вв}}(\tau, p)$, рассчитанных по полученной формуле, с соответствующими табличными значениями показывает, что ее относительная погрешность не превышает $\pm 0,02\%$ в метеорологическом диапазоне температуры воздуха, т.е. от -50 до 60°C , и в диапазоне p от 500 до 1100 гПа. Она входит в качестве состав-

лящей относительной погрешности вычисления парциального давления водяного пара, находящегося в смеси с воздухом. В пересчете на погрешность точки росы это составляет: $\pm 0,002$ °C при $T = -50$ °C; $\pm 0,003$ °C при $T = 0$ °C; $\pm 0,004$ °C при $T = +50$ °C. Для оценки степени значимости полученных погрешностей можно обратить внимание, что на уровне исходной фундаментальной зависимости, как показано выше, отличие по двум сопоставленным формулам, например, при $T = 0$ °C составляет $0,012$ °C, т.е. вчетверо больше, чем за счет погрешности полученной формулы для X .

При вычислениях на ПМК для экономии регистровой памяти представляется возможным придать полученной формуле более компактный вид, выполнив ряд преобразований:

$$X_{wb}(T, p) = 1,0004 + [4 \cdot 10^{-6} + 5,56 \cdot 10^{-10} (T + 0,03p - 27)^2] p \quad (5)$$

или, заменив численные значения величин символами:

$$X_{wb}(T, p) = b_c + [b_1 + b_2 (T + b_3 p - b_4)^2] p. \quad (6)$$

Формулы для $E_n(T)$ и $X_{wb}(T, p)$ используются во всех последующих вычислениях и соответственно программы вычислений этих величин используются как подпрограммы.

Анализ рассмотренных формул обращает внимание на то, что помимо непосредственно измеряемых гигрометрических величин прецизионные измерения требуют данных о давлении и температуре воздуха.

При измерениях точки росы в реальных условиях необходимо принимать во внимание, что в зоне влажочувствительного элемента (зеркала) давление p_T отличается от давления анализируемого воздуха p_b из-за разрежающего действия побудителя расхода. Поэтому определять парциальное давление водяного пара в воздухе следует по формуле

$$e_b = E_n(T) X_{wb}(T, p_T) \frac{p_a}{p_T}, \quad (7)$$

а относительную влажность —

$$\varphi_b = \frac{E_n(T) X_{wb}(T, p_T)}{E_n(t) X_{wb}(t, p_b)} \frac{p_b}{p_T}. \quad (8)$$

Очевидно, что по формуле аналогичного вида должны вычисляться эти величины при их воспроизведении прецизионными генераторами влажности (на методе двух температур или двух давлений);

$$e_k = E_n(t_n) X_{ws}(t_n, p_n) \frac{p_k}{p_n}, \quad (9)$$

$$\varphi_k = \frac{E_n(t_n) X_{ws}(t_n, p_n)}{E_n(t_k) X_{ws}(t_k, p_k)} \frac{p_k}{p_n}. \quad (10)$$

В последних двух формулах величины с индексом "н" относятся к наситителю, а с индексом "к" — к камере. Если $p_s = p_c$, то формулы переходят в вышеприведенные. Все это дает основание для выполнения общей универсальной программы вычислений.

Прецизионные вычисления гигрометрических величин по известной температуре t' смоченного термометра, температуре t паравоздушной смеси и ее общему давлению p проводятся по формуле /2/:

$$e_s = E_n(t') X_{ws}(t', p) - A_d p (t - t') (1 + a_w t'), \quad (11)$$

где A_d — действительное значение психрометрического коэффициента, которое определяется экспериментальным либо экспериментально-расчетным путем; a_w — коэффициент, учитывающий зависимость от температуры удельной теплоты фазового превращения конденсированной воды в пар и от других величин, входящих в выражение для психрометрического коэффициента, $a_w = 0,001 \text{ } 15 \text{ } (^{\circ}\text{C})^{-1}$ для дистиллированной воды по ГОСТ 6709-72 и состава сухого воздуха по ГОСТ 4401-81.

В последнем случае расчет A_d для прецизионного аспирационного психрометра выполняется по формуле

$$A_d = A_n - \gamma_n (v_d - v_n), \quad (12)$$

где A_n — номинальное значение психрометрического коэффициента для психрометра данного типа, экспериментально найденное при номинальном значении скорости аспирации v_n ; v_d — экспериментально найденное действительное значение скорости аспирации для данного экземпляра психрометра; γ_n — номинальное значение коэффициента пропорциональности для психрометра данного типа (практически не меняется от экземпляра к экземпляру).

В разработанной программе используются значения: $A_H = 662 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $v_H = 20 \text{ м/с}$; $\gamma_H = 56 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \text{ с}$ для аспирационных психрометров М-34 и МВ-4.

Прецизионные вычисления точки росы по заданному значению парциального давления водяного пара в паровоздушной смеси, а также парциального давления водяного пара и точки росы по заданному значению относительной влажности являются обратными по отношению к ранее рассмотренным. Вычисления здесь осложняются тем, что зависимость давления насыщенного водяного пара, от температуры в аналитической форме для прецизионных вычислений содержит трансцендентное слагаемое и степени выше первой, поэтому выражение точки росы в явном виде невозможно. В связи с этим при вычислениях используются итерационные циклы, при реализации которых на каждом шаге итерации вычисляется значение давления насыщенного водяного пара по прецизионной формуле для очередного приближенного значения точки росы. Первое приближенное значение точки росы можно найти по явному выражению ее из двухчленной формулы Зонтага /3, 7/ для зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры:

$$\ln E_w(\tau) = A_w T_\tau^{-1} + B_w,$$

где $T_\tau = T + T_0$; $T_0 = 273,15 \text{ К}$; $A_w = -5,418 \text{ 701 } 248 \cdot 10^3 \text{ К}$; $B_w = 21,648 \text{ 097 } 94$. Из этой формулы

$$T_\tau = \frac{A_w}{\ln E_w - B_w}. \quad (13)$$

Вычисление очередного приращения точки $\Delta_j T_\tau$ росы выполняется по формуле

$$\Delta_j T_\tau = \frac{\Delta_j e}{\dot{v}_j} = \frac{E_{nj} - e_n}{\dot{v}_j}, \quad (14)$$

где E_{nj} - очередное приближенное значение давления насыщенного водяного пара; e_n - известное значение парциального давления водяного пара; $\dot{v}_j$ - производная в точке $T_{\tau j}$:

$$\dot{v}_j = dE_w(T_\tau)/dT_\tau = -A_w E_w T_{\tau j}^{-2} \quad (15)$$

Предельное значение приращения на последнем цикле итерации выбра-

но равным 10^{-3} °C, что обеспечивает необходимую точность и вместе с тем не увеличивает чрезмерно время счета.

Возможна также организация вычислений с постоянным числом циклов итераций. Она приводит к более короткой программе, но в большинстве случаев время счета не оптимально, поскольку постоянное число циклов должно выбираться наибольшим из всех, возникающих при счете. Однако даже применение этой модификации не обеспечивает возможности вычисления в пределах одной программы по φ или по t' одновременно e и τ из-за недостаточного объема программной памяти ПМК. В связи с этим в указанных двух случаях приходится пользоваться пакетом из двух программ.

В последующей публикации будут приведены программы и комментарии к ним.

Список литературы

1. Бегунов А.А., Качкачишвили Л.Д., Матвеев Л.Т. О давлении насыщенного водяного пара // Метеорология и гидрология. - 1978. - № 2. - С.101-104.
2. ГОСТ 8.524-85. Психрометрические таблицы. Построение, содержание, расчетные соотношения. - М.: Изд. стандартов, 1985. - 34 с.
3. Зонтаг Д. Новые значения термодинамических величин водяного пара // Измерительная техника. - 1982. - № 9. - С.54-56.
4. Международные метеорологические таблицы, I-II серии, подготовленные С.Летестю. ВМО - № 188 TP.94/Пер. под ред. А.Х.Хргиана. - Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1975. - 266 с.
5. Goff J.A. Saturation pressure of water on the New-Kelvin Scale // Proc. Symp. Humidity and Moisture. - New York: Reinhold, 1965.
6. Kostyrko K., Szumowski J., Szer-szen A. Tablice psychrometriczne i hydrometryczne // Państwowy Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. - Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1982. - 614 s.
7. Sonntag D. Formeln verschiedenen Genauigkeits-grades zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes über Wasser und über Eis und ihre Anwendung auf einige praktische Feuchte-mess-auf-gaben // Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR, N 129 (B XVII). - Berlin: Akademie-Verlag, 1982. - 60 S.
8. Wexler A. Vapor pressure equation for water // J. Res. NBS. A. Physics and Chemistry. - 1976. - 80A. - P.213-230.

СОДЕРЖАНИЕ

П.Я.Н и к и ш к о в. Требования к метеооборудованию, предназначенному для получения метеоинформации, необходимой при обеспечении взлета и посадки воздушных судов на аэродромах ГА	3
А.С.С о л о н и н. Об анализе и синтезе систем метеорологического обеспечения авиации	26
А.С.С о л о н и н. О координирующих стратегиях в иерархической системе управления воздушным движением с учетом метеорологических условий	33
С.М.П е р о и н, Л.В.А н и с к и н. Об измерении характеристик ветра на аэродромах	40
Р.А.К р у г л о в. Ретрорефлекторы для трансмиссометров	51
Ю.А.Ж и т а р е в, Н.А.П л е ш к о в а, Е.В.Р о м а н о в. О повышении достоверности показаний базисных фотометров ФИ-1 при работе в составе автоматической метеостанции	57
А.А.А ф а н а с ь е в, Е.В.Р о м а н о в. Полуавтоматическое кодирование групп явлений погоды в метеосообщениях автоматических аэродромных станций	62
С.М.П е р с и н, В.И.Л а й х т м а н. Характеристики изменчивости поля метеорологической оптической дальности (МОД) в оптически неоднородной атмосфере	71
В.И.Л а й х т м а н, С.М.П е р с и н. Исследования структуры поля дальности видимости одиночного огня в оптически неоднородной атмосфере	85
Л.С.М о р д о в и н а. О возможности получения информации о метели с помощью измерения электрического тока	99
С.М.П е р с и н, Л.А.Щ е п а н о в с к а я. Об измерениях турбулентных потоков двумя комплектами пульсационной аппаратуры в приземном слое атмосферы	109
Т.П.Г р и б о в а, Л.А.Г р о ш е в а. Об уточнении алгоритмов пространственного контроля режимной метеорологической информации на ЕС ЭВМ	119
Э.Г.Б о г д а н о в а. Использование связей между различными метеорологическими характеристиками в алгоритмах изнутристанционного контроля (на примере атмосферных осадков)	125

Л.Ф.Школяр. Об опыте критического контроля результатов наблюдений за влажностью воздуха	I35
Т.П.Грибова. О восстановлении значений температуры почвы на глубинах под естественным покровом при автоматизированном контроле информации	I40
В.С.Копычева, Т.П.Светлова. О возможности получения осредненных по площади величин при контроле режимной метеорологической информации	I47
И.В.Колотовкин, В.В.Осипова, Е.А.Федорова. Автоматизированная обработка данных радиометеорологических станций М-107	I55
Л.С.Мордовина, Е.Е.Федорович. Сопоставление методов приведения атмосферного давления, применяемых в международной оперативной практике	I61
Б.М.Ильин, Е.Е.Федорович, Е.Н.Чурина. Опыт использования сплайн-функций для расчета климатических характеристик суммарной радиации по данным срочных актинометрических наблюдений	I69
Г.П.Резников. Прецизионные вычисления гигрометрических величин с применением программируемых микрокалькуляторов (формулы)	I82

Сборник научных трудов

Труды ГГО

вып. 523

МЕТОДИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Редактор В.И. Кузьменко

Н/К

Подписано в печать 28.12.88. М-27242. Формат 60x88/16. Бумага
офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 12,09. Усл.кр.-отт. 12,32.
Уч.-изд. л. 12,18. Тираж 500 экз. Индекс МОЛ-110. Заказ 94
Цена 85 коп. Заказное.

Гидрометеиздат, 199226, Ленинград, В.О., ул. Беринга, д. 38.

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата"
Госкомиздата СССР.

109033, Москва, Ж-33, ул. Волочаевская, д. 40.