

ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ РЯДОВ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЕТРОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

вед. специалист Н.Н.КАЗАКОВА¹, д-р техн. наук М.Б.ФРИДЗОН²

¹ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, aerology@aari.ru

²Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА), г. Москва.

С целью оценки однородности рядов данных радиозондирования на российских антарктических станциях на примере обсерватории Мирный рассмотрены вопросы организации аэрологических наблюдений за период с 1956 г. по настоящее время. Дано описание используемых технических средств зондирования, методик производства наблюдений и обработки информации.

Ключевые слова: Антарктида, аэрологические наблюдения, технические средства радиозондирования, погрешности, методика, однородность.

ВВЕДЕНИЕ

Антарктический континент является одним из тех немногих районов земного шара, где антропогенные воздействия на природу несоизмеримо малы по сравнению с другими территориями. В то же время для Антарктиды имеются достаточно длинные ряды метеорологических и аэрологических наблюдений. Поэтому аэрологические данные, полученные в Антарктиде, могут быть весьма полезны при исследовании вопроса о причинах глобального потепления – несут ли эти причины естественный природный характер или лежат в области влияния человеческой деятельности.

Аэрологические наблюдения проводятся в Антарктиде с 1956 г., то есть уже более полувека. Однако, прежде чем использовать эти длинные ряды наблюдений, необходимо убедиться в их однородности. То есть необходимо определить, нет ли искусственных сдвигов или трендов в результатах зондирования вследствие смены систем зондирования или изменений в методике обработки данных. Основным фактором, способным оказать существенное влияние на однородность рядов данных аэрологических наблюдений, является неоднократное изменение способа определения координат радиозондов и, прежде всего, высоты при их подъеме. Этот фактор значим при анализе рядов всех измеряемых при радиозондировании параметров атмосферы – давления на заданном уровне, температуры и влажности воздуха, параметров скорости ветра.

При анализе температурных рядов наиболее значимыми являются также изменения конструктивного исполнения датчика температуры и связанные с ним основная погрешность датчика (погрешность в стационарных условиях), инерционная погрешность, а также способ введения и величины радиационных поправок. При анализе рядов влажности безусловное значение имеют конструкция и принцип действия датчика влажности, его основная погрешность, функция влияния температуры, а также динамические характеристики.

В рамках настоящей статьи авторы постарались зафиксировать даты и характер изменений конструкции радиозондов и систем зондирования, основные технические и метрологические характеристики датчиков радиозондов и наиболее существенные изменения, вносимые в методику проведения радиозондирования и обработки его результатов.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Аэрологические наблюдения проводились в Антарктиде на станциях Мирный, Молодежная, Беллинсгаузен, Новолазаревская, Восток и Ленинградская. Наиболее длинный ряд аэрологических наблюдений в Антарктиде имеется для обсерватории Мирный. Первый выпуск радиозонда был произведен в обсерватории 12.02.1956 г. Проведение зондирований на этой станции продолжается практически без перерывов до настоящего времени. За указанный период имело место неоднократное переоснащение аэрологической сети отечественными системами радиозондирования. В 1956–1957 гг. в обсерватории Мирный использовались радиозонд РЗ-049 с пеленгуемым передатчиком ПРБ-051 на частоте 204 МГц и радиоприемником РП-2. Затем, с 1957 по 1960 г. – радиозонд РЗ-049 и радиотеодолит «Малахит»; в 1961 г. – радиотеодолит «Малахит» и радиозонд А-22-III; с 1962 по 1975 г. – радиотеодолит «Малахит» с дальномерной приставкой и радиозонд А-22-IV (VII); с 10.03.1975 г. по 1986 г. – РЛС «Метеорит-2» и радиозонд РКЗ-5; с 1987 по 2007 г. – РЛС «Метеорит-2» и радиозонд МАРЗ 2-2; с февраля 2008 г. по настоящее время – модернизированный комплекс АВК-1 и радиозонд МРЗ-3А.

С начала организации в Антарктиде аэрологических наблюдений для производства зондирования атмосферы использовался гребенчатый радиозонд РЗ-049 с УКВ-передатчиком. При этом направление и скорость ветра рассчитывались по данным параллельных шаропилотных наблюдений. Внедрение в 1957 г. радиотеодолита «Малахит» и радиозонда РЗ-049 с пеленгуемым радиоблоком позволило отказаться от этого вида наблюдений.

Гребенчатый радиозонд РЗ-049 позволял измерять и передавать по радио основными сигналами температуру, давление и влажность воздуха. Прием сигналов осуществлялся на слух с помощью ультракоротковолновых радиоприемников. Использовался кодовый способ передачи и приема сигналов. Датчиком давления служил блок из anerоидных коробок; датчиком температуры – биметаллическая пластинка (сталь – инвар); датчиком влажности – пучок обезжиренных человеческих волос. Радиозонд РЗ-049 имел следующие технические и метрологические характеристики. Диапазон измерения температуры воздуха составлял от -70°C до $+40^{\circ}\text{C}$, чувствительность (разрешающая способность) – $1,4\text{--}1,8^{\circ}\text{C}$ на один зубец. Датчик температуры размещался в шахте внутри корпуса прибора. Его постоянная времени составляла около 20 с. Измерение давления производилось в диапазоне от 1050 до 10 гПа, чувствительность барокоробки составляла от 12,5 до 15 гПа на 1 мм длины гребенки давления. Для устранения влияния температуры воздуха на показания давления в радиозонде РЗ-049 применялся биметаллический термокомпенсатор. Пределы измерения относительной влажности воздуха составляли от 20 % до 100 %. Чувствительность приемника влажности – 8–10 % на зубец гребенки влажности.

Переход на радиозонд А-22 на аэрологической сети СССР произошел 01.01.1961 г. В полярных районах он начал осуществляться с 1962 г. Тогда же на аэрологической сети начала использоваться система радиозондирования «Малахит-А-22».

Радиозонд А-22-III являлся электромеханическим по способу измерения и в то же время кодовым, передающим значения метеорологических элементов с помощью десяти знаков Морзе. Радиозонд А-22-III состоял из узлов давления, температуры и влажности воздуха и кодового барабана, смонтированного на жестком каркасе. Датчиком давления служил блок из двух anerоидных коробок из фосфористой бронзы

с биметаллическим термокомпенсатором. Диапазон измерения давления составлял от 1050 до 10 гПа. Чувствительность – 4–5 гПа на дорожку. Диапазон измерения температуры составлял от –75 °С до +40 °С. Датчиком температуры являлась биметаллическая спираль (сталь – инвар толщиной 0,12 мм), помещенная в радиационную защиту – тонкий зачерненный внутри фольговый цилиндр. Постоянная времени такого датчика составляла 10 с в тропосфере и около 1 мин в стратосфере. Чувствительность была 0,45–0,55 °С на дорожку. Датчиком влажности служила обезжиренная животная пленка (золотобица) в виде круглой мембраны, закрепленной в алюминиевых пальцах. Чувствительность радиозонда по относительной влажности составляла 1–2 % на дорожку. Диапазон измерения от 15 до 100 %.

Внедрение радиотеодолита «Малахит» способствовало увеличению высоты температурно-ветрового зондирования и повышению точности измерений скорости ветра. В то же время радиотеодолит, вследствие значительной погрешности в измерении вертикального угла при значениях < 16°, не позволял получать данные ветра при больших удалениях радиозонда (сильных ветрах).

Усовершенствованный вариант радиозонда А-22 – радиозонд А-22-IV – отличался от предшественника тем, что пропеллер для вращения кодового барабана был заменен миниатюрным электромотором. Усовершенствованной моделью радиозонда А-22-IV являлся радиозонд А-22-VII. Он отличался от А-22-IV улучшенным узлом давления. Вместо бронзовых барокоробок использовались стальные, которые имели малый коэффициент температурного расширения и не требовали термокомпенсации. В радиозондах А-22-IV и А-22-VII для работы совместно с радиотеодолитом «Малахит» применялся радиопередатчик-ответчик А-35. Внедрение дальномерной приставки к радиотеодолиту «Малахит» позволило осуществить переход от радиотеодолитного метода зондирования к радиолокационному, при котором наклонная дальность радиозонда измерялась способом вторичной радиолокации.

Необходимость автоматизации процесса приема сигналов радиозонда стала очевидной, и одновременно с созданием системы «Малахит-А-22» была разработана новая радиолокационная станция «Метеор» (в стационарном варианте «Метеорит») и радиозонд РКЗ. С 1960 г. эта система начала внедряться на аэрологической сети. Система «Метеорит-РКЗ» – это одноканальная система комплексного зондирования атмосферы, в которой впервые был автоматизирован процесс измерения и регистрации координат радиозонда и телеметрической информации. С целью повышения точности сопровождения радиозонда по угловым координатам, особенно при больших удалениях радиозонда, в РЛС «Метеорит» использовался дециметровый диапазон радиоволн (17 см). Оригинальность системы «Метеорит-РКЗ» состояла в использовании в радиозондах в качестве передатчика-ответчика суперрегенеративного генератора СВЧ. Дальность действия системы составляла 150 км, высота зондирования – до 30 км. В качестве первичных преобразователей в радиозондах РКЗ были использованы резистивные преобразователи – терморезистор ММТ-1 и пленочный сорбционно-деформационный датчик влажности (СДД), сохранившиеся в радиозондах, с некоторыми конструктивными изменениями, до настоящего времени.

В 1967 г. была произведена модернизация узла температуры радиозонда, позволившая уменьшить погрешность ее измерения. Прибор с новой конструкцией датчика температуры и новым эффективным антирадиационным покрытием (эмаль ВЛ-548) [49] получил название РКЗ-2. С 1968 г. этот тип радиозондов начал использоваться на антарктических станциях. В радиозонде РКЗ-2 для передачи данных о метеорологических параметрах принята амплитудная (амплитудно-импульсная) модуляция несущей частоты. Диапазон измерения температуры воздуха от –80 °С до +50 °С; диапазон измерения относительной влажности – 15–100 %, диапазон измерения давления воздуха – от приземного до 3–5 гПа.

В 1971 г. РЛС «Метеорит» была усовершенствована и на сеть начала поставляться РЛС «Метеорит-2» с радиозондом РКЗ-5. Он отличался от радиозонда РКЗ-2 увеличенной длительностью метеопаз и почти в два раза уменьшенной частотой передачи метеорологических параметров. За счет сужения полосы приемной системы РЛС была повышена ее чувствительность и увеличена дальность сопровождения радиозонда. Баропереклюатель в радиозонде РКЗ-2 был заменен электромеханическим коммутатором с микроэлектродвигателем. На антарктических станциях радиозонды РКЗ-5 начали использоваться: на ст. Молодежная – с 1973 г.; в обсерватории Мирный и на ст. Новолазаревская – с 1975 г.; на ст. Беллинсгаузен – с 1976 г. и на ст. Восток – с 1978 г.

Появление новой элементной базы поставило на повестку дня задачу создания легкого, малогабаритного и экономичного радиозонда. В связи с этим был разработан транзисторный радиозонд МАРЗ. В 1982 г. началось его серийное производство. Радиозонд МАРЗ впервые в практике отечественного радиозондирования был аттестован Госстандартом как средство измерения. На аэрологическую сеть новые малогабаритные радиозонды типа МАРЗ начали поступать с 1983 г. (в Антарктиду – с 1987 г.). Радиозонды МАРЗ полностью выполнены на полупроводниковых элементах и интегральных микросхемах. Был применен стабилизатор питания, что позволило уменьшить погрешность радиотелеметрического канала. Использование электронного коммутатора повысило надежность автоматической обработки результатов зондирования.

Необходимость уменьшения трудозатрат при проведении радиозондирования и успехи в области элементной базы и автоматизации обработки данных создали предпосылки для разработки нового наземного оборудования системы радиозондирования, снабженного комплексом для автоматической обработки сигналов. Так была создана система радиозондирования «Титан-МРЗ», получившая после государственных испытаний в конце 1983 г. название «АВК-1-МРЗ-3А». В Антарктиде система «АВК-1-МРЗ-3А» была введена в эксплуатацию на ст. Молодежная – в 1988 г. и на ст. Беллинсгаузен – в 1991 г.

По метрологическим характеристикам системы «АВК-1-МРЗ-3А» и «Метеорит-МАРЗ» практически не отличаются, так как в их основу заложены идентичные основные принципы: контактный метод измерений метеоэлементов; преобразование измеряемых параметров в электрическое сопротивление и электрического сопротивления в низкочастотный сигнал, модулирующий несущую частоту непосредственно в радиозонде; радиолокационный способ измерений вертикального угла и наклонной дальности, необходимых для определения высоты радиозонда (с использованием супергетеродинного передатчика-ответчика в радиозонде), те же основные схемные решения и, самое главное, одинаковые датчики. Отличием системы зондирования «АВК-1-МРЗ-3А» от «Метеорит-МАРЗ» является автоматическая обработка результатов зондирования. Система «АВК-1-МРЗ-3А» начала поступать на сеть с 1986 г. и на антарктических станциях используется до настоящего времени.

Система имеет следующие технические характеристики: несущая частота 1782 ± 8 МГц; частота следования запросных радиоимпульсов $457,5 \pm 0,2$ Гц, импульсная мощность передатчика РЛС-1 – 25 кВт, длительность импульса передатчика 0,5–1,2 мкс, ширина диаграммы направленности $6 \pm 1^\circ$, поднесущая (суперирующая) частота 800 ± 25 кГц, дальность действия 300 км. В конструкцию комплекса заложено много новых технических решений, способствующих повышению эксплуатационных характеристик системы. Для уменьшения влияния расхождения радиозонда на надежность приема его сигнала в антенной системе РЛС применена круговая поляризация. Особенностью конструкции станции является применение в качестве малошумящего СВЧ-усилителя и мощного передатчика запросного сигнала специального электронно-лучевого прибора – потенциал-

трона. Для уменьшения минимальной дальности действия и санитарно-защитной зоны системы введена регулировка уровня излучаемой мощности передатчика. В целях повышения помехоустойчивости системы для передачи телеметрической информации применена частотная манипуляция поднесущей (суперирующей) частоты приемопередатчика радиозонда МРЗ-3А. Применение в аппаратуре станции автоматической подстройки частоты передатчика и гетеродина приемного устройства позволило значительно повысить надежность и качество работы радиосистемы и упростить работу оператора. Комплекс обеспечивает тестовый и функциональный контроль, полную автоматизацию процесса приема и обработки координатно-телеметрической информации радиозонда, вплоть до выдачи всех видов аэрологических телеграмм. В последние годы осуществляется модернизация комплекса путем замены специализированной ЭВМ на современные универсальные ПЭВМ и применения полупроводниковых приемо-передающих устройств. Радиозонды МАРЗ и МРЗ-3А имеют следующие технические и метрологические характеристики: диапазон измерения температуры воздуха от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; предел допускаемого значения основной погрешности измерения температуры составляет $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, постоянная времени – не более 10 с; диапазон измерения относительной влажности (в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 15–98 %, предел допускаемого значения основной погрешности измерения относительной влажности – 15 %, постоянная времени в нормальных условиях – не более 5 с; диапазон измерения давления от наземного до 3–5 гПа.

Программное обеспечение «ЭОЛ» выполняет все необходимые этапы работ: от предполетной поверки радиозонда до обработки телеметрической информации в реальном масштабе времени и представления выходных данных в виде оперативной телеграммы ТВЗ, телеграммы «Слой» и «Приземный слой». Режим «просмотр» позволяет производить редактирование особых точек на участках профиля каждого метеорологического параметра. С помощью программы «Архив» можно контролировать временные профили метеозлементов и вертикальной скорости подъема радиозонда.

Приведенные выше технические и метрологические характеристики радиозондов весьма полезны при анализе однородности рядов аэрологических наблюдений. При этом не следует забывать, что полученные при радиозондировании результаты являются реально измеренными с определенной степенью достоверности. В эти данные вводится только радиационная поправка, с помощью которой результаты измерений температуры исправляются на величину радиационного нагрева датчика температуры. Поэтому в настоящей статье радиационным поправкам будет уделено особое внимание.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА. СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВОК

Основные особенности процесса измерения температуры и влажности воздуха при радиозондировании атмосферы заключаются в следующем: используется контактный метод измерения (непосредственный контакт датчика с измеряемой средой); статическая характеристика преобразования (СХП) датчиков радиозондов (градуировка) получена в нормальных условиях, существенно отличающихся от рабочих условий их применения; измерения производятся в динамическом режиме, поскольку радиозонд во время подъема обтекается потоком воздуха с изменяющимися влажностью, температурой, скоростью и плотностью; датчики подвергаются воздействию значительного количества физических процессов, параметры которых плохо определены (солнечная и длинноволновая радиация, смачивание жидкими осадками и т.д.).

Достоверное определение радиационных поправок при измерении температуры воздуха при радиозондировании атмосферы является одной из ключевых проблем методики аэрологических наблюдений [5, 6, 12, 25, 27, 39, 40, 42, 43]. Вводившиеся

Таблица 1

Значения средней вертикальной скорости (ω), относительной плотности воздуха (ρ_0/ρ_z) и скорости вентиляции ($\rho\omega$) для радиозонда РЗ-049

Параметр	H, км												
	1	5	10	15	18	20	22	24	26	28	30	32	35
ω , м/с	313	340	390	420	440	460	480	500	520	540	557	575	600
ρ_0/ρ_z	1,1	1,66	2,97	6,33	10,16	13,93	18,96	26,2	35,8	46,9	62,7	84,6	150,1
$\rho\omega$, м/с	285	205	131,5	66,2	43,3	33,0	25,3	19,1	11,5	11,5	8,9	6,8	4,0

в показания российских радиозондов радиационные поправки были получены путем сравнения данных радиозондирований, выполненных в дневное и ночное время при стационарных метеорологических условиях [6]. Формула для расчета радиационной поправки к температуре, измеренной радиозондом РЗ-049, имеет вид:

$$\Delta t' = 0,85 \frac{\rho\omega^{-0,71}}{10} (0,0854h^3 - 1,125h^2 + 5,8h + 0,7\sin 90h + 3), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; ω – вертикальная скорость; h – высота Солнца в десятках градусов.

Формула (1) использовалась для расчета радиационных поправок в диапазоне высот Солнца от 5 до 90°. Особенностью этих поправок является то, что они рассчитаны для высот и давлений по стандартной атмосфере и с учетом средней вертикальной скорости подъема радиозонда (табл. 1).

В случае, если фактическая вертикальная скорость подъема радиозонда отличается от табличной, найденная радиационная поправка умножается на поправочный множитель:

$$K = \frac{\omega_F^{-0,71}}{\omega_T} = \frac{\Delta\tau_T^{-0,71}}{\Delta\tau_F}, \quad (2)$$

где ω_F – фактическая скорость подъема; ω_T – табличная вертикальная скорость; $\Delta\tau_F$ – разность фактического времени прохождения радиозондом уровня стандартного давления, для которого определяется радиационная поправка, и предыдущего уровня стандартного давления; $\Delta\tau_T$ – аналогичная разность по средней (табличной) вертикальной скорости. Исправление на фактическую вертикальную скорость подъема (множитель K) проводится начиная со стандартного уровня давления 200 гПа.

Определение радиационных поправок для радиозонда А-22-III аналогично методике определения поправок к радиозонду РЗ-049. В этом случае формула для расчета поправки имеет вид:

$$\Delta t = 0,66 \frac{\rho\omega^{-0,68}}{10} (0,0367h^3 - 0,5h^2 + 2,52h + 1). \quad (3)$$

Данные для расчета Δt по формуле (3) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние вертикальные скорости (ω) и скорости вентиляции ($\rho\omega$) для радиозонда А-22-III

Параметр	H, км												
	1	5	10	15	18	20	22	24	26	28	30	32	35
ω , м/с	318	340	385	412	430	440	450	463	473	484	495	505	522
$\rho\omega$, м/с	285	205	129,6	65,0	43,2	31,6	23,7	17,6	13,2	10,3	7,8	6,0	3,5

Как и для зонда R3-049 в случае, если фактическая вертикальная скорость подъема радиозонда отличается от табличной, то найденная радиационная поправка для высот выше 200 гПа умножается на поправочный множитель:

$$K = \frac{\Delta\tau_T^{-0,68}}{\Delta\tau_F}$$

Эмпирическое уравнение для расчета радиационной поправки для радиозонда РКЗ-1 в зависимости от высоты Солнца и скорости вентиляции имеет вид [27, 25]:

$$\Delta t = 0,84 \frac{\rho\omega^{-0,69}}{10} [(0,5h - 2,5)10^{-0,04h} + 9,5], \quad (4)$$

где h – угловая высота Солнца в десятках градусов; $\rho\omega$ – скорость вентиляции. Данные для расчетов Δt по формуле (4) представлены в табл. 3.

Дополнительная поправка на фактическую вертикальную скорость начиная с уровня 200 гПа вводится с помощью множителя

$$K = \frac{\Delta\tau_T^{-0,69}}{\Delta\tau_F}$$

Дальнейшее уточнение методики введения радиационных поправок в измерения температуры радиозондами А-22 и РКЗ-2 производилось в 1967–1968 гг. С первого января 1969 г. были введены новые радиационные поправки, а также была уточнена методика их расчета [34]. Для определения радиационных поправок для радиозондов А-22 стала использоваться следующая упрощенная формула:

$$\Delta t_z = \lambda_0 \frac{\rho_0 \omega_0^{0,83}}{\rho_z \omega_z} \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_z, \quad (5)$$

где $\lambda_0 = 4,1$ с; $\omega = 5$ м/с; T – температура датчика температуры; ω – вертикальная скорость; ρ – плотность воздуха.

В случае, если фактическая вертикальная скорость подъема радиозонда отличалась от приведенной в табл. 4, радиационная поправка умножалась на поправочный множитель K :

$$K = \frac{\omega_F^{-0,83}}{\omega_T} = \frac{\Delta\tau_T^{-0,83}}{\Delta\tau_F}, \quad (6)$$

где ω_F – фактическая вертикальная скорость; ω_T – табличная вертикальная скорость; $\Delta\tau_F$ – фактическое время подъема радиозонда от предыдущего уровня стандартного давления до уровня, для которого определяется радиационная поправка; $\Delta\tau_T$ – время подъема между уровнями по средней (табличной) вертикальной скорости.

Радиационные ошибки для радиозонда РКЗ-2 рассчитывались по формуле (7):

$$\Delta T_z = C \left(\frac{\rho_0 \omega_0}{\rho \omega} \right)^n$$

Таблица 3

Средние вертикальные скорости (ω) и скорости вентиляции ($\rho\omega$) для радиозонда РКЗ-1

Параметр	H, км												
	1	5	10	15	18	20	22	24	26	28	30	32	35
ω , м/мин	313	339	372	406	401	397	399	401	415	434	440	454	472
$\rho\omega$, м/мин	284	204	130	64.5	39	29	21	15	12	9	7	6	4

Таблица 4

Средние вертикальные скорости (ω) для радиозонда А-22									
Скорость	H, км								
	1	5	10	15	18	20	22	24	26
ω , м/мин	287	316	364	404	419	422	428	439	458
Скорость	H, км								
	28	30	32	34	36	38	40	42	
ω , м/мин	472	489	525	573	627	678	729	781	

Таблица 5

Значения средних вертикальных скоростей (ω) для радиозонда РКЗ-2																
Скорость	H, км															
	1	5	10	15	18	20	22	24	26	28	30	32	36	38	40	42
ω , м/мин	275	304	353	368	378	386	392	410	426	434	454	460	480	494	506	520

Величины C и n были определены графически по изменению разностей показаний температуры радиозондом днем и ночью, исправленных на величину суточного хода температуры воздуха на соответствующей высоте и в зависимости от скорости вентиляции.

В связи с тем, что предложенные в методических указаниях (МУ) [29, 31, 34] радиационные поправки позволяют лишь в грубом приближении оценить величину дневного радиационного нагрева датчика относительно температуры воздуха, измеренной датчиком ночью, принимаемой за реальную [11], их введение не может полностью скорректировать явление радиационного нагрева. Неоднократные по-

Таблица 6

Радиационные поправки и их разности $\Delta T(1-2)$ для радиозонда РЗ-049, рассчитанные на основании МУ (вып. 19 [29] и вып. 25 [31]) для различных уровней в атмосфере

Высота (км)/ давление (гПа)		Высота Солнца						Среднее $\Delta T(1-2)$, °C
		10°	20°	30°	40°	50°	60°	
16,2/100	МУ, вып. 19	-2,4	-2,9	-3,6	-4,0	-4,3	-4,5	-0,4
	МУ, вып. 25	-2,2	-2,7	-3,0	-3,5	-3,9	-4,0	
	$\Delta T(1-2)$	-0,2	-0,2	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	
20,6/50	МУ, вып. 19	-4,1	-5,3	-6,4	-7,2	-7,8	-8,1	-1,5
	МУ, вып. 25	-3,3	-4,2	-4,7	-5,3	-6,0	-6,2	
	$\Delta T(1-2)$	-0,8	-1,1	-1,7	-1,9	-1,8	-1,9	
23,8/30	МУ, вып. 19	-5,8	-7,5	-9,0	-10,2	-11,0	-11,4	-2,7
	МУ, вып. 25	-4,4	-5,6	-6,2	-7,1	-8,0	-8,2	
	$\Delta T(1-2)$	-1,4	-1,9	-2,8	-3,1	-3,0	-3,2	
26,4/20	МУ, вып. 19	-8,0	-10,3	-12,3	-14,0	-15,1	-4,5	-4,1
	МУ, вып. 25	-5,7	-7,2	-8,0	-9,1	-10,2	-4,0	
	$\Delta T(1-2)$	-2,3	-3,1	-4,3	-4,9	-4,9	-5,1	
31,2/10	МУ, вып. 19	-15,8	-20,4	-24,4	-27,8	-29,6	-31,1	-10,9
	МУ, вып. 25	-9,3	-11,9	-13,2	-14,9	-16,8	-17,3	
	$\Delta T(1-2)$	-6,5	-8,5	-11,2	-12,9	-12,8	-13,8	

следующие исследования и международные сравнения радиозондов [8, 10, 15, 16, 17, 20, 21, 26, 45, 47, 48, 50] подтвердили некорректность введения существующих поправок [34] и показали, что они не удовлетворяют современным требованиям к метрологическому обеспечению радиозондирования. В работе [26] указывалось, что среднее квадратичное отклонение полученной методом «день минус ночь» величины радиационной поправки составляет 30 % самой величины поправки.

Впервые на аэрологической сети радиационные поправки по методике [29] начали вводиться с 1 июля 1957 г. Дальнейшие изменения методики были введены в практику обработки данных радиозондирования с 1 января 1961 г. [31] и с 1 января 1969 г. [34]. Результаты сравнения температур воздуха на высотах выше уровня 100 гПа, рассчитанных при использовании радиационных поправок в соответствии с МУ [29, 31, 347], приведены в табл. 6, 7.

Как видно из табл. 6, радиационные поправки, рассчитанные по методике [29], значительно выше уточненных поправок методики [31]. Их разность увеличивается с высотой, достигая на уровне 10 гПа при высоте Солнца $60^\circ - 13,8^\circ\text{C}$. Таким образом, с июля 1957 г. по 1 января 1961 г. дневные значения температуры воздуха по данным радиозондов РЗ-049 выше уровня 100 гПа следует считать существенно заниженными.

Переход на радиозонды А-22 в полярных районах начал осуществляться с 1962 г. Поскольку в период зондирования с помощью системы «Малахит-А-22» в основном использовалась методика введения радиационных поправок, предложенная в МУ, вып. 25 [31], то для оценки корректировки данных радиозондирования за период с 1.01.1961 г. по 1.01.1969 г. целесообразно учитывать следующие величины $\Delta T(2-3)$, представляющие собой разность между радиационными поправками, введенными на основе МУ, вып. 25 [31] и МУ, вып. 38 [34], приведенные в табл. 7.

В отличие от табл. 6, из которой следует, что радиационные поправки по [29] были завышены, особенно на уровне 10 гПа, табл. 7 показывает, что поправки по методике [31] по сравнению с последующей [34] оказались заниженными. Это означает, что за период наблюдений с 1961 по 1968 г. показания радиозондов в свет-

Таблица 7

Радиационные поправки для радиозонда А-22 в методиках МУ, вып. 25 [31] и вып. 38 [34] для различных высот зондирования

Высота(км)/ Давление (гПа)	Методика	Высота Солнца						Средняя $\Delta T(2-3)$, °С
		10°	20°	30°	40°	50°	60°	
16,2/100	МУ, вып. 25	-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1		0,2
	МУ, вып. 38	-0,8	-1,0	-1,0	-1,2	-1,4	-1,5	
	$\Delta T(2-3)$	+0,2	+0,2	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	
20,6/50	МУ, вып. 25	-1,1	-1,4	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9	0,3
	МУ, вып. 38	-1,2	-1,6	-1,7	-2,1	-2,3	-2,5	
	$\Delta T(2-3)$	+0,1	+0,2	+0,1	+0,4	+0,5	+0,6	
23,8/30	МУ, вып. 25	-1,5	-1,9	-2,2	-2,4	-2,5	-2,7	0,6
	МУ, вып. 38	-1,8	-2,2	-2,5	-3,0	-3,4	-3,7	
	$\Delta T(2-3)$	0,3	0,3	0,3	0,6	0,9	1,0	
26,4/20	МУ, вып. 25	-2,0	-2,5	-3,0	-3,2	-3,3	-3,5	0,9
	МУ, вып. 38	-2,5	-2,9	-3,5	-4,1	-4,6	-5,0	
	$\Delta T(2-3)$	0,5	0,4	0,5	0,9	1,3	1,5	
31,2/10	МУ, вып. 25	-3,1	-4,0	-4,7	-5,1	-5,3	-5,6	1,7
	МУ, вып. 38	-3,9	-4,9	-5,8	-7,0	-7,8	-8,4	
	$\Delta T(2-3)$	0,8	0,9	1,1	1,9	2,5	2,8	

лое время суток должны быть уменьшены на соответствующие средние разности. Введение радиационных поправок по методике [34] применяется в настоящее время для всех последующих типов радиозондов: РКЗ-2, РКЗ-5, МАРЗ-2-2, МРЗ-3А.

ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Как известно, влажность воздуха играет значительную роль в целом ряде метеорологических процессов. В то же время проблема измерения влажности в свободной атмосфере является одной из важнейших в современной аэрологии, поскольку точность ее измерения радиозондами нельзя считать удовлетворительной. Несмотря на то, что существует большое количество методов измерения влажности, до сих пор в наиболее массовом сетевом радиозонде МРЗ-3А используется датчик влажности, не позволяющий получать достоверную информацию о влажности воздуха, особенно при отрицательных температурах. Используемый в указанном радиозонде датчик из животной пленки относится к сорбционно-деформационным датчикам. Такие же датчики использовались начиная с 1962 г. для измерения влажности в радиозондах А-22-3 (4), РКЗ-2, РКЗ-5 и МАРЗ-2-2. Следует отметить, что животная пленка в 2–3 раза чувствительнее волоса и имеет меньшую температурную зависимость, однако из-за значительного увеличения инерционности все пленочные датчики удовлетворительно работают лишь до высот 5–7 км.

Метрологические характеристики пленочных датчиков влажности описаны в работах [1, 2, 3, 7, 44, 48]. Выполненный в этих работах анализ показал, что погрешность датчиков влажности в нормальных условиях в конце гарантийного срока не превышает 15 %. При этом ряд погрешностей, обусловленных влиянием оболочки, выделением водяного пара батареей питания и т.д., учесть невозможно.

Для учета влияния температуры воздуха на результаты измерения влажности в работе [34] на основе экспериментальных данных была предложена эмпирическая формула, описывающая влияние температуры на статистические характеристики преобразования (СХП) пленочного датчика:

$$\varphi = 0,87(1,15\varphi_{\text{изм}})^n, \quad (8)$$

где $n = 1,284 \exp(-0,0125T)$; φ – действительное значение относительной влажности; $\varphi_{\text{изм}}$ – измеренное значение относительной влажности; T (°C) – температура датчика.

Формула (8) достаточно корректно описывает влияние температуры на СХП пленочного датчика и может быть использована для введения поправок в показания сетевых радиозондов типа А-22, РКЗ, МРЗ. При ее использовании систематическая составляющая погрешности пленочных датчиков будет уменьшена с 20 % до 4 %.

Следует учитывать, что при попадании радиозонда в облака или в зону осадков на высотах до 5–7 км может иметь место смачивание датчика. Погрешность измерений, возникающая за счет смачивания, приводит к завышению верхней границы облачности, поскольку смоченный датчик при выходе из облака некоторое время показывает повышенную влажность воздуха. Время, в течение которого наблюдается эффект смачивания, можно оценить [15] по формуле:

$$t = \Phi / W_M, \quad (9)$$

где W_M – скорость испарения воды с единицы поверхности; $\Phi = 150 \text{ г/м}^2$ – влагоемкость чувствительного элемента пленочного датчика влажности.

Результаты расчетов показывают, что время высыхания датчика составляет около 10 мин для тропосферы и до 70 мин для стратосферы. Это означает, что при скорости подъема радиозонда 5 м/с завышение толщины облачного покрова по данным описанного выше датчика может достигать 2–3 км.

По требованию Всемирной метеорологической организации (ВМО) погрешность измерения относительной влажности не должна превышать +5 % в тропосфере и +10 % в стратосфере. Этим требованиям отвечают разработанные в настоящее

время радиозонды МРЗ-3А*, АК2 и РФ-95, в которых датчиком влажности служит тонкопленочный конденсатор со специальным полимерным диэлектриком толщиной 1 мкм. Постоянная времени такого датчика в нормальных условиях не превышает 10 с, а допускаемая погрешность измерения по каналу относительной влажности не более 7 %. Радиозонды типа АК2 начали применяться на аэрологической станции Мирный с 2009 г.

ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ (ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА) РАДИОЗОНДА

Главной причиной погрешности измерения атмосферного давления радиозондами с помощью anerоидных датчиков являются их температурная зависимость, гистерезис и упругое последствие. Для исключения гистерезиса радиозонд градуируется как при уменьшении давления, так и при его росте. Упругое последствие частично устраняется посредством «массирования» барокоробок. Однако для коробок из фосфористой бронзы остаточное влияние гистерезиса может составлять 1–2 гПа, а величина упругого последствия – 3–7 гПа. С внедрением радиозондов А-22-3 [31] с anerоидными коробками, изготовленными из специальных сортов стали, имеющих температурный коэффициент в 10–30 раз меньший, чем у фосфористой бронзы, погрешность измерения за счет влияния температуры была существенно снижена. Тем не менее в работах [28, 24] было рекомендовано использовать данные радиозондирования, выполненных радиозондом А-22-3, лишь до высоты 30 км, а достоверными считать данные только до высоты 25 км.

При расчете высоты изобарических поверхностей барометрическим методом в простейшем виде используется барометрическая формула для изотермической атмосферы [12]:

$$H_p = 18409,988 \lg(P_0/P)(1 + T_{\text{ср}}/273,15), \quad (10)$$

где H_p – высота, на которой измерено давление воздуха P (высота изобарической поверхности); P_0 – давление воздуха у поверхности Земли; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура воздуха между уровнями давления P_0 и P .

При радиолокационном методе определения высоты подъема радиозонда ошибка измерения определяется соотношением:

$$\Delta H_p = -D \cos \delta \Delta \delta + \sin \delta \Delta D, \quad (11)$$

где D , ΔD – измеренное расстояние до зонда и инструментальная ошибка его измерения; δ , $\Delta \delta$ – измеренный угол между направлением на зонд и горизонтом и его инструментальная ошибка.

Методика расчета высот изобарических поверхностей приведена в работах [28, 37]. Сравнение погрешностей определения высоты подъема радиозонда барометрическим и радиолокационным методами, выполненная в [28], показало, что в тропосфере более точными являются высоты, определенные барометрическим методом (при прямых измерениях давления); а в стратосфере – высоты, рассчитанные по данным радиолокационных измерений. При этом, поскольку при зондировании радиозондом РЗ-049 для обработки применялась барометрическая формула для сухого воздуха, необходимо, согласно [35], введение поправки на влажность воздуха.

В соответствии с [36] при зондировании системой «Метеорит-РКЗ» для расчета давления по высотам стали учитывать не геометрическую, а геопотенциальную высоту. Уточнение методики обработки давления потребовало внедрения новой стандартной атмосферы (ГОСТ 4401-73). Начиная с 1950 г. расчет высот изобарических поверхностей производился с помощью гипсометрических таблиц [41], рассчитанных А.Т.Бергун по барометрической формуле, в основу которой была положена барометрическая постоянная, равная 8000 (для используемого при обработке круга А-57). В то же время ГОСТ 4401-73 установил барометрическую

постоянную равной 7995,352 (для круга А-57М). Оценки систематических погрешностей при использовании более ранней барометрической постоянной для расчета геопотенциальных высот составили: на уровне 500 гПа – 4 м; 100 гПа – 12 м; 10 гПа – 25 м; 5 гПа – 48 м.

В соответствии с работами [23, 24, 26, 28, 36] был сделан вывод о том, что при зондировании атмосферы системой «Метеорит-РКЗ» с использованием геометрической высоты подъема радиозонда, определяемой по радиолокационным данным, для определения геопотенциала на заданном уровне допустимо применение барометрической формулы для изотермической атмосферы с учетом влажности воздуха.

Наиболее информативными для прогноза погоды данными радиозондирования являются высоты геопотенциала изобарических поверхностей и давление на уровнях особых точек (аэрологическая телеграмма по коду КН-04). Для оценки погрешности расчета давления на стандартных уровнях и уровнях особых точек используется формула, приведенная в [48]:

$$\Delta P_n = \Delta P_{n-1} - \frac{P_{n-1}}{R} q \left[\frac{\Delta(Z_n - Z_{n-1})}{\bar{T}_v^2} \Delta \bar{T}_v \right] \cdot \exp \left[-\frac{q}{R} \frac{Z_n - Z_{n-1}}{\bar{T}_v} \right], \quad (12)$$

где $\Delta P_n, \Delta P_{n-1}$ – погрешности определения давления на верхней и нижней границах исследуемого слоя ($Z_n - Z_{n-1}$); $\Delta \bar{T}_v$ – погрешность определения средней виртуальной температуры слоя; $\Delta(Z_n - Z_{n-1})$ – погрешность определения толщины слоя.

Погрешности определения высот геопотенциала изобарических поверхностей вычисляются по формуле из [28]:

$$\Delta H_n = H_n \frac{\Delta \bar{T}_n}{\bar{T}_n}, \quad (13)$$

где $\Delta \bar{T}_n$ – погрешность средней температуры слоя; \bar{T}_n – средняя температура слоя; H_n – высота геопотенциала изобарической поверхности.

Оценив погрешности определения давления можно получить и оценки погрешности геопотенциала:

$$\Delta h_{2n} = -\frac{T}{\lambda} \ln \left(\frac{P + \Delta P}{P} \right), \quad (14)$$

где Δh_{2n} – геопотенциальная высота слоя, $\alpha = q/R$; \bar{T} – средняя температура воздуха в слое.

Сравнения средних ошибок радиозондов различных типов по давлению и высоте приведено в таблице 8 из работы [13]. Как видно из табл. 8, значение давления у радиозондов РЗ-049 и А-22-3 систематически занижены, что приводит к завышению барометрических высот по сравнению с радиолокационными. Барометрическое определение высот имеет наименьшую погрешность для РКЗ-1, затем А-22-3, наименее точным является зонд РЗ-049 [18].

Таблица 8

Средние погрешности радиозондов различных типов по давлению (гПа) и высоте (м)				
Погрешности	РЗ-049	А-22-3	РКЗ-1	Радиолокация
ΔP	-1,7	-2,75	0,7	0
ΔH	419	373	60	0
ΔH_p	230	373	-95	0
ΔH_t	189	00	155	0
Δt_m	2,6	00	2,1	0

Примечание. $\Delta H = \Delta H_p + \Delta H_t$, $\Delta H_p = b \Delta P$, $\Delta H_t = H \Delta t_m / 273$, b – барометрическая ступень, м

СРОКИ ЗОНДИРОВАНИЯ

Необходимость учета суточного хода метеорологических параметров атмосферы при климатических исследованиях обуславливает большое значение информации о сроках, в которые производилось зондирование. Поскольку обсерватория Мирный обладает наиболее длинным рядом наблюдений, то изменения сроков радиозондирования в течение всего периода наблюдений удобно проследить по этой станции. С 12 апреля 1956 г. — сроки зондирования 06 и 18 часов московского декретного времени. С 1 февраля 1957 г. до мая 1967 г. сроки наблюдений 06 ч 12 мин, 18 ч 12 мин, 12 ч 12 мин и 00 ч 12 мин по местному среднесолнечному времени. С 1 мая 1967 г. были установлены сроки выпуска 05 ч 42 мин, 11 ч 42 мин, 17 ч 42 мин, 23 ч 42 мин (местное среднесолнечное время). Было установлено резервное время 30 мин до срока, то есть фактическое время выпуска 05 ч 12 мин и т.д. С 1983 г. — стандартные сроки выпуска радиозондов 00, 12, 06, 18 по Гринвичу (ГМТ) с сохранением резервного времени выпуска. С марта 2000 г. по настоящее время в обсерватории Мирный проводится одноразовое зондирование.

Изменения в программе наблюдений и времени зондирований имели место и на других антарктических станциях. Так, на станции Молодежная с 9-й САЭ (1964 г.) по 14-ю САЭ (1969 г.) проводилось одноразовое зондирование; с 15-й САЭ (1970 г.) по 36-ю САЭ (1991 г.) — двухразовое зондирование, с марта 1992 г. (37-я САЭ) по 1.02.1998 г. (43-я РАЭ) — одноразовое зондирование. На всех других станциях: Новолазаревская, Восток, Беллинсгаузен, Ленинградская — в течение всего рассматриваемого периода проводилось одноразовое зондирование атмосферы в срок 00 по Гринвичу, а в периоды МГИ (Международный Геофизический календарь) проводилось двухразовое зондирование (дополнительно в 12 ГМТ), за исключением станций Беллинсгаузен и Ленинградская, на которых проводилось только одноразовое зондирование.

Как видно из вышеизложенного, синхронизация данных наблюдений для анализа климата атмосферы, особенно с точки зрения исследований его долгосрочной изменчивости, представляет весьма нетривиальную задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены основные особенности организации и методов обработки аэрологических наблюдений в Антарктиде. В течение рассматриваемого периода имели место и другие изменения (определение высот главных изобарических поверхностей, ускоренный способ обработки ветровых данных по условной вертикальной скорости подъема радиозонда, различные критерии выбора нижней границы тропопаузы и другие), которые в той или иной степени влияли на результаты обработки и которые при использовании материалов наблюдений следует учитывать. Подробное рассмотрение всех изменений, которые имели место в течение рассмотренного длительного периода наблюдений, позволит разного рода исследователям (метеорологам, климатологам) более обоснованно и корректно осуществлять анализ и интерпретацию многолетних рядов данных аэрологических наблюдений в Антарктиде, особенно при выявлении трендов различных метеорологических параметров применительно к проблеме исследования причин глобального потепления климата.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук А.П.Макитасу за помощь в подготовке и редактировании статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров А.М., Фридзон М.Б. Исследование функций влияния температуры на датчики влажности радиозонда РКЗ и возможности ее нормирования // Тр. ЦАО. 1983. Вып. 151. С. 28–33.
2. Балагуров А.М., Фридзон М.Б., Дозорцев А.Р. К оценке постоянной времени сорбционных датчиков влажности радиозондов // Метеорология и гидрология. 1984. № 4. С. 114–117.

3. Балагуров А.М., Дозорцев А.Р., Немировский И.Б., Фридзон М.Б. К распределению относительной влажности в свободной атмосфере // Современное состояние аэрологических исследований в СССР и использование аэрологической информации в службе прогнозов и народном хозяйстве: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по аэрологии 24–30 июня 1985 г. Москва ВДНХ. М.: 1985. С. 126–128.
4. Гайгеров С.С. Аэрология полярных районов. М.: Гидрометеиздат, 1964. 304 с.
5. Гутерман И.Г. Радиационная ошибка гребенчатого радиозонда // Метеорология и гидрология. 1955. № 5. С. 49–52.
6. Демидова В.Н., Решетов В.Д., Тихомирова Н.Д. Ошибки измерения высот изобарических поверхностей в стратосфере // Тр. ЦАО. 1976. Вып. 118. С. 10–16.
7. Дозорцев А.Р. К измерению влажности стратосферы радиозондами // Метеорология и гидрология. 1983. № 7. С. 116–119.
8. Зайцева Н.А., Ахметьянов Р.К., Кархунен П. О результатах сравнения радиозондов советского и финского производства // Метеорология и гидрология. 1989. № 1. С. 105–110.
9. Зайцева Н.А. Аэрология. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 322 с.
10. Зайчиков П.Ф. Предварительные результаты обработки материалов наблюдений 2-го международного сравнения радиозондов // Тр. ЦАО. 1957. Вып. 22. С. 51–59.
11. Зайчиков П.Ф. Методика определения радиационных поправок к показаниям температуры радиозондами А-22, РКЗ-1 и РЗ-049 по данным разностей «день минус ночь» // Тр. ЦАО. 1962. Вып. 43. С. 10–21.
12. Зайчиков П.Ф. Защиты термодатчиков РЗ-049, А-22-III и РКЗ-1 от радиации // Тр. ЦАО. 1962. Вып. 43. С. 22–34.
13. Зайчиков П.Ф. Некоторые дополнения к методу «тройного контроля». Точность независимых способов определения высоты поднимаемой системы // Тр. ЦАО. 1964. Вып. 60. С. 43–53.
14. Иванов А.А., Кац А.П., Курносенко С.И., Нэш Дж., Зайцева Н.А. Сравнение радиозондов по Международной программе ВМО этап III (Заключительный отчет за 1989 г.). Комиссия по приборам и методам наблюдений ВМО. Женева. 1991. Отчет № 40, 126 с.
15. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: УРО РАН. 2004. 596 с.
16. Казакова Н.Н. О сравнениях данных температурно-ветрового зондирования, полученных разными системами // Тр. ААНИИ. 1998. Т. 409. С. 93–111.
17. Кархунен П., Трифонов Г.П., Юрманов В.А. Сравнение советской системы радиозондов «Метеорит-2-МАРЗ-ОКА-3» с финской «MicroCoга» // Метеорология и гидрология. 1987. № 11. С. 111–115.
18. Коковин Н.С. Радиотелеметрия зондирования атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 163 с.
19. Кречмер М.В. Ошибка измерения скорости и направления ветра из-за неточного измерения координат // Труд ЦАО. 1966. Вып. 74. С. 89–95.
20. Кречмер М.В., Шляхов В.И., Глаголев Ю.А. и др. Некоторые результаты сравнений аэрологических радиотермометров // Метеорология и гидрология. 1969. № 10. С. 98–102.
21. Кузнецов А.Ф., Шляхов В.И. Реализация программы международных сравнений аэрологических радиозондов // Тр. ЦАО. 1976. Вып. 118. С. 33–39.
22. Марфенко О.В. Случайные ошибки радиозонда РЗ-049 // Тр. ЦАО. 1957. Вып. 22. С. 35–39.
23. Марфенко О.В. Случайные ошибки измерений метеоэлементов в свободной атмосфере радиозондами А-22-IV и РКЗ-1А // Тр. ЦАО. 1962. Вып. 43. С. 35–41.
24. Марфенко О.В. К вопросу о достоверности высоких подъемов радиозондов А-22-III(IV) // Труды ЦАО. 1964. Вып. 60. С. 34–42.
25. Марфенко О.В., Маркелова К.И. Результаты исследования радиационных ошибок радиозонда РКЗ с термистором в условиях полета // Тр. ЦАО. 1965. Вып. 67. С. 24–30.
26. Марфенко О.В. Оценка точности результатов радиозондирования на аэрологической сети Советского Союза // Метеорология и гидрология. 1969. № 3. С. 14–21.
27. Марфенко О.В. Температурные ошибки радиозонда РКЗ-2 и методика его эксплуатации // Тр. ЦАО. 1971. Вып. 102. С. 11–19.

28. *Марфенко О.В.* Метрологическое исследование метода измерения давления при радиозондировании атмосферы // Тр. ЦАО. 1983. Вып. 147. С. 3–9.
29. Методические указания ЦАО. Вып. 19. М.: Гидрометеиздат, 1957. 33 с.
30. Методические указания ЦАО. Вып. 23. М.: Гидрометеиздат, 1959. 34 с.
31. Методические указания ЦАО. Вып. 25. М.: Гидрометеиздат, 1960. 45 с.
32. Методические указания ЦАО. Вып. 24. М.: Гидрометеиздат, 1961. 41 с.
33. Методические указания ЦАО. Вып. 36. М.: Гидрометеиздат, 1967. 27 с.
34. Методические указания ЦАО. Вып. 38. М.: Гидрометеиздат, 1968. 50 с.
35. Методические указания ЦАО. Вып. 39. М.: Гидрометеиздат, 1968. 46 с.
36. Методические указания ЦАО. Вып. 47. М.: Гидрометеиздат, 1978. 12 с.
37. Методические указания ЦАО. Вып. 49. М.: Гидрометеиздат, 1981. 20 с.
38. Методические указания ЦАО. Вып. 53. М.: Гидрометеиздат, 1986. 30 с.
39. *Молчанов П.А.* О точности зондирования атмосферы методом радиозондов // Метеорология и гидрология. 1936. № 2. С. 30–41.
40. *Покровский В.Н., Шметер С.М.* Радиационные ошибки гребенчатого радиозонда // Тр. ЦАО. 1955. Вып. 14. С. 23–31.
41. Психрометрические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 269 с.
42. *Решетов В.Д.* О радиационном перегреве гребенчатого радиозонда и его влиянии на результаты зондирования атмосферы // Тр. ЦАО. 1958. Вып. 24. С. 59–71.
43. *Фридзон М.Б., Шляхов В.И.* О некоторых особенностях измерения температуры радиозондами на больших высотах // Тр. ЦАО. 1971. Вып. 102. С. 130–138.
44. *Фридзон М.Б., Зайчиков Б.П., Балагуров А.М., Таланов В.Д.* Температурная зависимость узла влажности радиозонда РКЗ. Информационные материалы по гидрометеорологическим приборам и методам наблюдений // Тр. НИИГМП. 1978. Вып. 74. С. 12–14.
45. *Фридзон М.Б.* Анализ метрологического обеспечения датчиков температуры радиозондов // Тр. ЦАО. 1983. Вып. 147. С. 9–19.
46. *Фридзон М.Б.* Физическая модель погрешности измерения температуры и влажности при радиозондировании атмосферы // Тр. НИИП. 1985. Вып. 48. С. 24–37.
47. *Фридзон М.Б., Зайчиков Б.П., Хромова Н.В.* О радиационных поправках при измерении температуры радиозондами // Метеорология и гидрология. 1988. № 6. С. 126–132.
48. *Фридзон М.Б.* Оценка погрешностей измерений температуры и влажности при радиозондировании на аэрологической сети СССР // Метеорология и гидрология. 1989. № 5. С. 114–118.
49. *Фридзон М.Б.* К исследованию метрологических характеристик датчиков влажности сетевых радиозондов // Тр. ЦАО. 1990. Вып. 168. С. 48–56.
50. *Фридзон М.Б.* Оценка погрешности измерений температуры и влажности при радиозондировании атмосферы. Метеорологические исследования в Антарктике // Сб. докладов на III Всесоюзном симпозиуме. Часть II. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 137–142.

N.N.KAZAKOVA, M.B.FRIDZON

ASSESSMENT OF UNIFORMITY OF THE DATA SERIES OF TEMPERATURE-WIND SOUNDING OF THE ATMOSPHERE AT THE RUSSIAN ANTARCTIC STATIONS

In order to evaluate the homogeneity of radiosonde data time series at the Russian Antarctic stations the organization of upper-air observations at Observatory Mirny over the period from 1956 to present is discussed. The description of the radiosounding systems, techniques of observations and data processing is presented.

Keywords: Antarctica, aerological observations, aerological hardware (technique, tools), uncertainty (inaccuracy), methodology, uniformity (homogeneity).