

А
Т
М

М.Ю. Червяков

3



С
Ф
Е
Р
Ы

ИДИРОВАНИЕ

Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского

М.Ю. Червяков

Зондирование атмосферы

Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся
по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология

Саратов

Издательский центр «НАУКА»

2019

УДК 551.501.7

ББК 26.233

Ч45

Червяков М.Ю.

Ч45 Зондирование атмосферы: учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология / М.Ю. Червяков. – Саратов: ИЦ «Наука», 2019. – 62 с.

ISBN 978-5-9999-3181-8

В учебно-методическом пособии изложены теоретические и практические особенности радиозондирования атмосферы. Рассматривается история развития и современное состояние сети аэрологических наблюдений в России.

Наиболее детально рассмотрен метод сетевого аэрологического зондирования свободной атмосферы на основе малогабаритного аэрологического радиолокатора МАРЛ-А.

Учебно-методическое пособие рекомендуется к использованию в учебном процессе в качестве дополнительной литературы по дисциплине «Методы зондирования окружающей среды», а также в процессе проведения летней учебной практики по «Методам зондирования атмосферы».

Рекомендует к печати:

кафедра метеорологии и климатологии

Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Рецензенты:

начальник аэрологической станции АЭ «Саратов» Саратовского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Приволжское УГМС» Е.А. Семенихина,

доцент кафедры метеорологии и климатологии Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, кандидат географических наук Н.В. Короткова.

ISBN 978-5-9999-3181-8

© Червяков М.Ю., 2019

Содержание

	стр.
Введение	4
1. Краткая история развития радиозондирования атмосферы	5
2. Аэрологические радиозондовые измерения	12
2.1. Общие сведения и определения	12
2.2. Методы радиозондовых измерений	20
2.3. Радиозонд	22
2.3.1. Датчики температуры	24
2.3.2. Датчики давления	29
2.3.3. Датчики относительной влажности	34
2.4. Современные наземные радиолокационные станции	40
2.5. Предполетная проверка и эксплуатация радиозондов	44
3. Основные принципы работы аэрологического локатора МАРЛ-А	50
Порядок проведения радиозондирования на аэрологической станции АЭ «Саратов» в летний период времени	54
Заключение	60
Библиографический список	61

Введение

Для изучения характеристик свободной атмосферы, в том числе температурного, влажностного и ветрового режимов используются различные виды дистанционного зондирования: акустическое, лазерное, ракетное, самолетное, спутниковое и другие. Несмотря на большое разнообразие средств измерений, пожалуй, самым распространенным и системным видом получения метеорологической информации в верхних слоях атмосферы является метод аэрологического радиозондирования.

В данном учебно-методическом пособии изложены теоретические и практические особенности радиозондирования атмосферы, описываются различные датчики, применяемые для определения метеопараметров, их погрешности и способы их устранения.

При написании учебно-методического пособия были использованы публикации о новейших достижениях отечественной аэрологии [1, 2, 12]. Рассматривается история развития и современное состояние сети аэрологических наблюдений в России.

Наиболее детально рассмотрен метод сетевого аэрологического зондирования свободной атмосферы на основе малогабаритного аэрологического радиолокатора МАРЛ-А, который, в том числе, используется уже более 10 лет на аэрологической станции АЭ «Саратов». Ежегодно станцию посещают в ознакомительных целях студенты кафедры метеорологии и климатологии СГУ, где они участвуют в полном цикле радиозондирования.

Учебно-методическое пособие рекомендуется к использованию в учебном процессе в качестве дополнительной литературы по дисциплине «Методы зондирования окружающей среды», «Методы и средства гидрометеорологических измерений», а также в процессе проведения летней учебной практики по «Методам зондирования окружающей среды».

1. Краткая история развития радиозондирования атмосферы

Изобретателем радиозонда и метода его использования для исследования атмосферы является выдающийся учёный-аэролог профессор Павел Александрович Молчанов (рис. 1).



Рисунок 1 – Павел Александрович Молчанов (1893 – 1941 гг.)

Впервые идея использования радиозондов была высказана им в 1923 г. в его научно-популярной брошюре «Воздушный океан». П.А. Молчанов предложил прибор с радиопередатчиком, передающий данные измерений по радио в пункт приёма. Таким образом, данные зондирования могли быть получены немедленно и независимо от дальнейшей судьбы прибора. Эта идея для того времени была исключительно смелой, поскольку радиотехника во всем мире только начинала развиваться [1].

Широко известна историческая дата 30 января 1930 г., когда в Павловской аэрологической обсерватории профессор П.А. Молчанов

осуществил запуск созданного им первого в мире радиозонда. С этого крупнейшего события в истории аэрологии и начинается развитие радиозондирования атмосферы в СССР, а затем и в других странах [2].

После первого успешного подъёма прибора в том же 1930 г. в Павловске было выпущено еще несколько радиозондов, а в следующем 1931 г. радиозондирование стало здесь основным методом исследования атмосферы. Вскоре радиозонды системы Молчанова были использованы для изучения арктической атмосферы: первые выпуски произведены во время международного арктического рейса дирижабля ЛЦ-127 «Граф Цеппелин» [2].

Во время проведения Второго Международного полярного года (МПГ) в период с 1931 по 1933 гг. радиозонды выпускались на четырех советских станциях. Ко времени проведения этих международных исследований ни одна из стран еще не располагала собственными радиозондами, хотя их разработки интенсивно велись в Германии и Франции. Поэтому во время Второго МПГ советские радиозонды нашли применение также и на некоторых зарубежных станциях.

В первые же годы гребенчатый радиозонд был существенно усовершенствован самим П.А. Молчановым и его ближайшими сотрудниками. Прежде всего, была снижена масса прибора, что обеспечивало бóльшую высоту зондирования. Большим достижением было введение измерений влажности воздуха (1933 г.) и некоторые другие усовершенствования радиозонда.

Тогда же (1936–1937 гг.) были начаты первые опыты совместного температурно-ветрового зондирования атмосферы путем радиопеленгации радиозондов наземными коротковолновыми приемными устройствами направленного действия. Этот метод был испытан в годы Великой Отечественной войны. Наряду с результатами температурного зондирования в службу погоды сообщались и данные о распределении ветра. Однако, существенные практические результаты в этом направлении были достигнуты позже, когда метод радиопеленгации уступил свое место радиолокационному способу определения координат. В.В. Костаревым было предложено

использовать радиолокатор для сопровождения шаров с пассивными отражателями. Это предложение нашло поддержку Е.К. Федорова и в 1943 г. такие работы были проведены в Центральной аэрологической обсерватории В.В. Костаревым и Г.И. Голышевым. В результате была показана возможность определения скорости и направления ветра до максимально возможных высот подъёма шара. Эта методика легла в основу современного радиолокационного способа измерения скорости и направления ветра (ранее измерения координат радиозонда проводились с помощью оптических теодолитов и были ограничены высотой облачности).

Гребенчатый радиозонд сменил радиозонд А-22 с баропереключателем, разработанный для системы радиозондирования А-22 - «Малахит» (1957 г.), которая была первой системой, в которой объединены измерения температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра и одновременно повышена их точность.

Радиотеодолит «Малахит», обеспечивающий проведение комплексного температурно-ветрового радиозондирования, применялся для аэрологического зондирования на широтах от Южного до Северного полюса – от Антарктиды до дрейфующих станций «Северный Полюс».

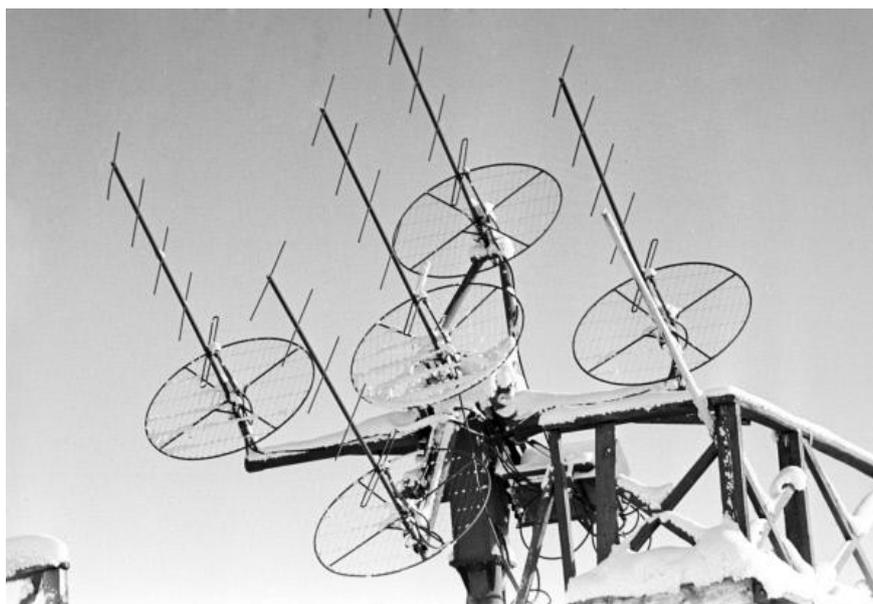


Рисунок 2 – Антенны для приема сигналов радиозондов системы «Малахит»

Создание комплексной системы зондирования атмосферы РКЗ - «Метеор», основанной на принципе использования сигнала радиолокационного ответчика для измерения дальности, позволило повысить надежность аэрологического зондирования, а применение электрического датчика температуры (терморезистора) в радиозондах РКЗ уменьшило ошибки измерений температуры на больших высотах. В ней впервые был автоматизирован процесс измерения и регистрации координат радиозонда и телеметрической информации.

Развитие сети аэрологических измерений было бы невозможно без научных исследований в области процессов измерений, обработки и взаимодействия датчиков с окружающей средой. Исследования влияния солнечной радиации на датчик температуры (С.М. Шметер, П.Ф. Зайчиков, В.Д. Решетов) позволили разработать теоретические основы радиационных поправок, которые впервые стали вводиться в значения температуры с 1957 года, а исследования адсорбционно-деформационного датчика влажности дали возможность определить его погрешности и границы применимости.

К началу 70-х годов была создана и внедрена на большинстве станций аэрологической сети система РКЗ-5-«Метеорит-2» как основная система зондирования атмосферы, отличающаяся большей дальностью надежного приема сигналов радиозонда (до 250 км), большей точностью измерения ветра, как в приземном слое, так и на больших высотах. Ветровое зондирование в этой системе было обеспечено передатчиком-ответчиком и уголковыми отражателями.

Важным достижением 1970-х годов является система автоматической обработки данных радиозондирования с помощью комплекса ОКА-3 на целом ряде станций аэрологической сети. Этот период отмечен также автоматизацией сбора и накопления климатических данных, широким распространением зондирования атмосферы на научно-исследовательских судах, разработкой малогабаритного радиозонда на интегральных микросхемах, новых специальных радиозондов и датчиков измерения температуры и влажности.

Задачи обеспечения безопасности полётов самолётов, дальнейшего увеличения экономичности и надежности системы зондирования потребовали разработки малогабаритного радиозонда. На основе проведенных разработок полупроводникового генератора СВЧ и низкочастотных узлов радиозонда на полупроводниках были созданы образцы малогабаритных радиозондов массой до 300 г и проведены их испытания.

Благодаря проведенным в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) метрологическим исследованиям и разработанным поверочным средствам, и методикам поверки радиозонды типа МАРЗ были внесены в Государственный реестр средств измерений.

Следующим крупным шагом в совершенствовании системы радиозондирования явилась разработка в период 1980-90 гг. новой системы радиозондирования АВК-1-МРЗ.

С помощью АВК-1 производится автономная автоматизированная обработка данных радиозондирования непосредственно на аэрологических станциях вплоть до выдачи стандартных аэрологических телеграмм с дальнейшей передачей подготовленных данных в центры сбора информации. Комплексы устанавливались на аэрологической сети с 1986 года и работают достаточно надежно, быстро осваиваются операторами аэрологами, облегчают их труд, сокращают время получения аэрологических телеграмм.

В системе АВК-1-МРЗ используются малогабаритные радиозонды типа МРЗ, имеющие вес менее 500 г.

Следующим этапом совершенствования технического оснащения аэрологической сети было создание аэрологического радиолокационного вычислительного комплекса (АРВК) нового поколения МАРЛ-А (А.В. Кочин, В.В. Чистюхин, А.А. Иванов, А.З. Дубовецкий, А.С. Азаров) с активной фазированной антенной решеткой, отличавшегося универсальностью (что позволяет работать с любым типом радиозонда, настроенного на международную частоту 1680 МГц), предельно упрощенной механической и развитой электронной частями [2].

Аэрологическая сеть России является неотъемлемой частью Глобальной мировой сети радиозондирования Всемирной службы погоды (ВСП) и проводит аэрологические наблюдения в соответствии с требованиями, сформулированными в нормативных документах Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [3].

Различные технические комиссии ВМО выработали требования к точности измерения аэрологических параметров, необходимой для получения достоверной информации о погодных (метеорологических) процессах. Поскольку абсолютную точность радиозондовых измерений установить крайне затруднительно, необходимо, как минимум, обеспечить условия для того, чтобы данные, получаемые с использованием различных типов радиозондов и систем зондирования, были сопоставимы. Поэтому, по решению Комиссии по приборам и методам наблюдений ВМО, периодически проводятся Международные сравнения систем радиозондирования, использующихся в разных странах [2].

В настоящее время российская сеть радиозондирования насчитывает 129 аэрологических станций: 127 на территории РФ и 2 в Антарктиде. Кроме того, аэрологическое зондирование проводится в рамках исследовательской программы дрейфующей станции «Северный полюс». До 1990-х гг., помимо наземных станций, в состав аэрологической сети страны также входили 19 судовых станций и от 1 до 2-х дрейфующих пунктов радиозондирования в составе ледовых станций «Северный полюс». Из-за высокой стоимости радиозондирования ряд станций в 90-е годы был законсервирован, однако благодаря реализации Проекта модернизации Росгидромета значительная часть из них возобновила работу.

Методическое руководство сетью осуществляет Центральная аэрологическая обсерватория. ЦАО разрабатывает методические пособия по эксплуатации технических средств и обработке результатов зондирования, регулярно осуществляет методические инспекции для проверки и оказания

помощи сотрудникам сети. Ежегодно проводятся курсы повышения квалификации аэрологов и инженеров по радиолокации, ведется контроль качества аэрологической информации [2].

Контрольные вопросы

1. Кто считается изобретателем первого в мире радиозонда? Когда и где был осуществлен первый в мире запуск радиозонда?
2. Где была создана первая в мире сеть станций регулярного радиозондирования?
3. Где были осуществлены первые выпуски радиозондов с дирижабля «Граф Цепелин»?
4. Какая методика легла в основу радиолокационного способа измерения скорости и направления ветра?
5. Какой радиозонд пришел на смену гребенчатому радиозонду?
6. Как назывался один из самых первых радиотеодолитов в СССР?
7. Какая система радиозондирования была создана и внедрена к началу 1970-х годов на большинстве станций аэрологической сети СССР?
8. Какая новая система радиозондирования появилась в период 1980-90 гг.?
9. Как расшифровывается аббревиатура МРЗ?
10. Сколько на сегодняшний момент действующих аэрологических станций на сети Росгидромета?

2. Аэрологические радиозондовые измерения

2.1. Общие сведения и определения

Приведенные ниже определения из публикаций ВМО [5, 6] относятся к аэрологическим измерениям с использованием радиозонда [3].

Радиозонд – прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (давления, температуры, влажности и др.), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

Радиозонд может прикрепляться к газонаполненной оболочке либо может сбрасываться (сбрасываемый зонд) с воздушного судна или ракеты.

Радиозондовое наблюдение – наблюдение с помощью радиозонда за метеорологическими параметрами на высотах, как правило, за атмосферным давлением, температурой и влажностью.

Аэрологическое наблюдение – метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямыми или косвенными методами измерения.

Аэрологическая станция – станция на поверхности земли, с которой проводятся аэрологические наблюдения.

Зондирование – определение одного или нескольких метеорологических параметров на высотах с помощью приборов, поднимаемых газонаполненной оболочкой, самолетом, змеем, планером, ракетой и т. п.

Радиозондовые системы обычно используются для измерения давления, температуры и относительной влажности. В большинстве оперативных пунктов радиозондовые системы используются также для определения ветра на высотах. Кроме того, на некоторых радиозондах установлены системы датчиков для определения актинометрических характеристик атмосферы или для определения концентрации озона. В этом случае радиозондирование называется актинометрическим или озонметрическим зондированием. Более

подробно со специальными видами радиозондирования можно ознакомиться в учебнике [7].

Единицами измерения метеорологических параметров при радиозондовых наблюдениях являются гектопаскаль для давления, градус Цельсия для температуры и процент для относительной влажности. Данные об относительной влажности сообщаются по отношению к давлению насыщенного пара над поверхностью воды даже при температурах ниже 0 °С.

Единицей геопотенциальной высоты, используемой при аэрологических наблюдениях, является стандартный геопотенциальный метр. В тропосфере значение геопотенциальной высоты приблизительно равно геометрической высоте, выраженной в метрах.

Аэрологические измерения температуры и относительной влажности – два вида основных измерений, данные которых используются при инициализации анализов моделей численных прогнозов погоды для оперативного прогнозирования погоды. Радиозонды обеспечивают большую часть измерений температуры и относительной влажности в точках над сушей, в то время как радиозонды, запускаемые с отдаленных островов или морских судов, обеспечивают ограниченный охват такими данными над океанами.

Точные измерения вертикальной структуры полей температуры и водяного пара в тропосфере чрезвычайно важны для всех видов прогнозирования, особенно для регионального и местного прогнозирования. Вертикальная структура полей температуры и водяного пара обуславливает устойчивость атмосферы и, следовательно, количество и формы облаков, которые должны прогнозироваться.

Данные измерений вертикальной структуры полей температуры и относительной влажности с высоким разрешением имеют большое значение для исследований загрязнения окружающей среды (например, для определения толщины инверсионного слоя атмосферы). Высокое разрешение при измерениях вертикальной структуры необходимо также для прогнозирования

влияния рефракции атмосферы на распространение электромагнитного излучения или звуковых волн.

Для гражданской авиации и космодромов, где к примеру, осуществляется запуск космических аппаратов, необходимы оперативные данные измерений плотности воздуха в зависимости от давления (рассчитанных на основе данных радиозондовых измерений температуры и относительной влажности).

Радиозондовые наблюдения чрезвычайно важны для исследований изменения климата на высотах [8].

Для исследований изменения климата, основанных на радиозондовых измерениях, требуется чрезвычайно высокая стабильность систематических погрешностей в данных радиозондовых измерений. Однако погрешности в более ранних радиозондовых измерениях некоторых метеорологических параметров, в частности относительной влажности и давления, были слишком высоки для того, чтобы обеспечить достоверную справочную базу на основе многолетних наблюдений на всех уровнях, с которых поступали данные с радиозондов. В связи с этим понадобились усовершенствования и изменения в конструкциях радиозондов. Кроме того, учитывая ограниченность средств, направляемых на метеорологические наблюдения, и желание продолжать широкомасштабное использование радиозондов, необходимо, чтобы расходные материалы для радиозондов оставались дешевыми. Соответственно, пользователям следует пойти на определенный компромисс в отношении точности систем измерений с учетом того, что изготовители радиозондов производят системы, которые должны работать в чрезвычайно широком спектре метеорологических условий:

- давление от 1050 до 5 гПа,
- температура от 50 до -90 °С,
- относительная влажность от 100 до 1 %.

При этом системы должны постоянно и надежно функционировать, несмотря на сильные дожди, грозы и тяжелые условия обледенения [3].

Наблюдения при помощи радиозондов проводятся на регулярной основе для измерений вплоть до высоты около 35 км. Однако большая часть наблюдений по всему земному шару проводится до высоты не более 25 км, что связано с более высокой стоимостью оболочек и газа, необходимых для подъема оборудования на высоты с очень низким давлением [3].

Мировая сеть станций радиозондирования на конец 2009 года насчитывает более 900 пунктов и приведена на рисунке 3.

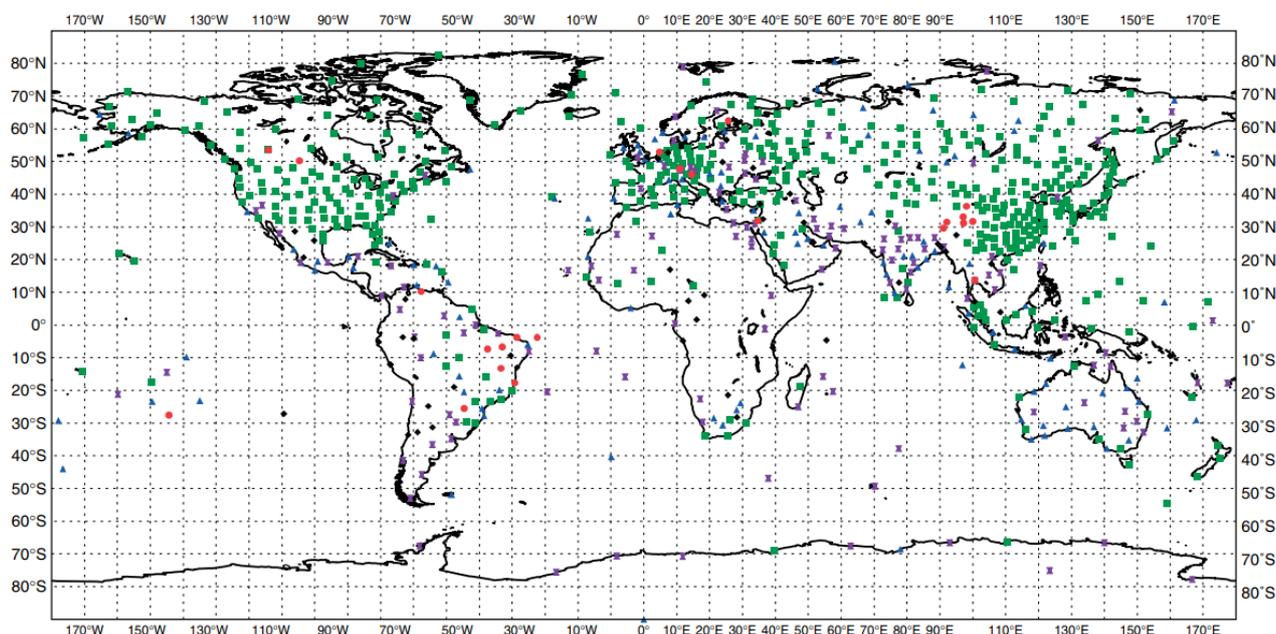


Рисунок 3 – Мировая сеть станций радиозондирования по данным European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [9]

В настоящее время сформировано несколько глобальных архивов данных радиозондирования: RATPAC–Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (NOAA), HadAT (Хэдли Центр), RAOBCORE and RICH (Венский Университет) [10]. Результаты аэрологических наблюдений за разные периоды времени также находятся в пополняющихся архивах КАРДС и «Аэростаб», и в массиве «Аэростас», который является продолжением последнего и создается по автоматизированной технологии на основе данных,

поступающих по каналам связи из Глобальной системы телесвязи гидрометеорологических служб. Оба массива вместе включают данные радиозондирования с 1978 г. по настоящее время для российских станций и с 1984 по настоящее время – для зарубежных. Массивы организованы в виде файлов, содержанием которых являются срочные аэрологические данные по всем станциям земного шара за один месяц. В процессе создания архивных файлов аэрологические данные проходят процедуру комплексного контроля качества [8].

С точки зрения оперативности поступления аэрологической информации и доступности данных стоит выделить достаточно большой архив результатов радиозондирования, который размещен на интернет-портале Университета Вайоминга, США (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) [11].

Архив Университета Вайоминга удобен еще и тем, что вся представленная информация доступна для любого пользователя и не требует дополнительной регистрации или навыков работы со сложными программными комплексами и нестандартными форматами хранения информации. Результаты аэрологического зондирования представлены как в табличной форме (распределение метеорологических параметров по высоте), так и в виде комплектов телеграмм, сформированных по правилам кода КН-04.

В настоящее время под управлением Росгидромета на территории Российской Федерации функционируют примерно 130 станций радиозондирования, одна станция в Арктике и две в Антарктиде [4, 10].

В глобальную аэрологическую сеть (ГСНК), состоящую всего из 150 станций радиозондирования, входят только 10 станций на территории РФ и два пункта, расположенные в Антарктике, принадлежащие России. Данные международного мониторинга показывают, что климатическая сеть в свободной атмосфере не в полной мере отвечает требованиям ГСНК, особенно на севере и северо-востоке России, что не позволяет ее в полной мере использовать в качестве индикатора климатических изменений в бассейне Северного Ледовитого и Тихого океана.

На рисунке 4 приведено распределение пунктов аэрологического зондирования на территории России.

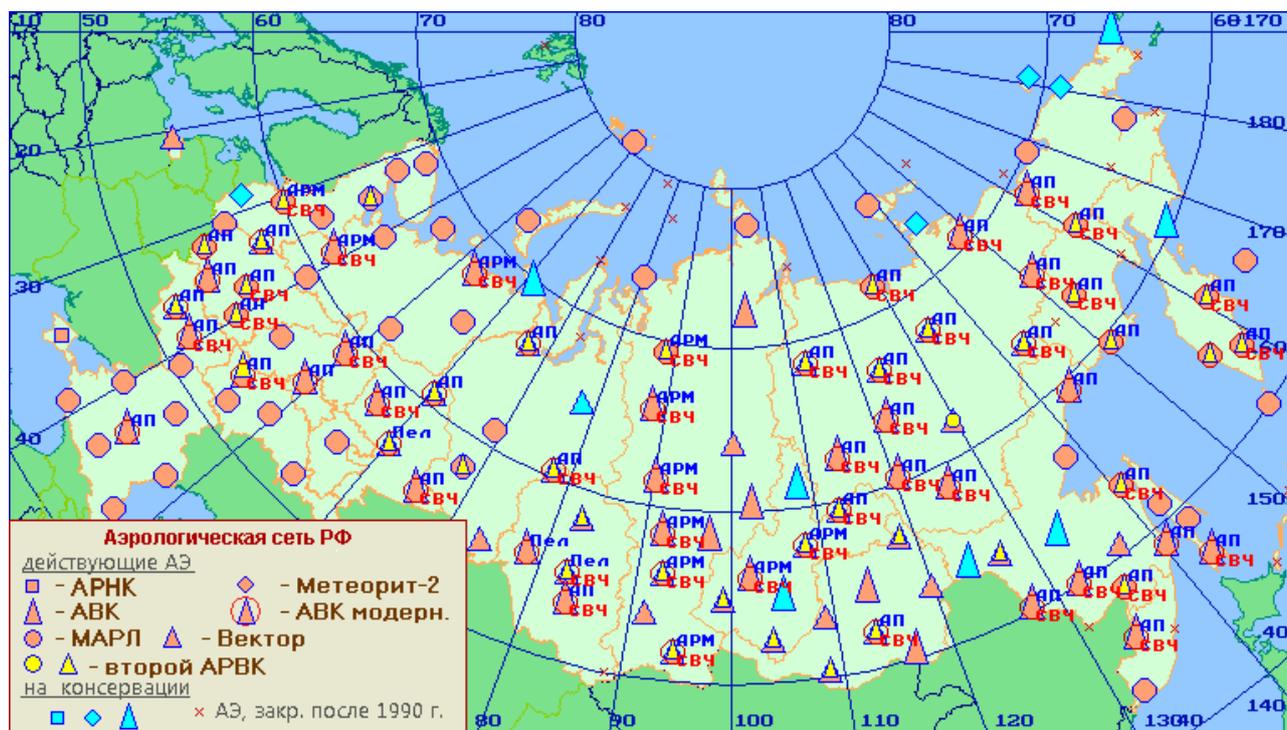


Рисунок 4 – Аэрологическая сеть России на начало 2019 года [4]

Наблюдения с помощью свободнолетающих радиозондов проводятся в стандартные сроки: 00 и 12 часов по Гринвичу, в результате которых получают данные о вертикальном распределении температуры, влажности, геопотенциальной высоты, направлении и скорости ветра, а также о давлении воздуха.

Информация включает значения метеорологических величин на стандартных изобарических уровнях и на стандартных высотах над поверхностью земли, уровнях тропопаузы и максимальной скорости ветра, а также на уровнях особых точек (резких изменений в вертикальном распределении) температуры, влажности, скорости и направления ветра.

Стандартными изобарическими поверхностями считаются уровни 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 гПа. Критерий выбора особых точек заключен в возможности восстановления вертикального

профиля температуры с точностью до 1°C в тропосфере и до 2°C в стратосфере, профиля относительной влажности с точностью до 15 % [8].

Измерение температуры и влажности происходит с помощью чувствительных элементов (датчиков), а скорость и направление ветра на разных высотах определяют по координатам радиозонда, с помощью сопровождения его радиолокатором. Результаты о вертикальной стратификации измеряемых метеорологических величин передаются радиозондом с помощью сигналов на наземную станцию слежения, откуда закодированная информация передается в оперативные центры посредством аэрологических телеграмм [8].

Во время полета в свободной атмосфере, при низком давлении в большинстве радиозондовых систем быстро возрастают погрешности измерения температуры. Поэтому некоторые из имеющихся радиозондовых систем вообще непригодны для проведения наблюдений при низком давлении на больших высотах. Проблемы, связанные с искажением показаний датчиков во время полета и очень большими величинами постоянной времени (инерции) датчиков при низкой температуре и низком давлении, ограничивают практическую пригодность радиозондовых измерений относительной влажности [3].

Требования к точности датчиков, применяемых при радиозондировании. Для получения точной и достоверной информации о метеорологических характеристиках в свободной атмосфере разработаны стандарты ВМО и национальных гидрометеорологических служб. Эти документы регламентируют предельные погрешности измерений.

Большинство современных радиозондовых систем позволяют измерять температуру в тропосфере со стандартной погрешностью в пределах от 0,2 до 0,5 °С. К сожалению, в некоторых сетях станций радиозондирования в тропических регионах все еще можно обнаружить стандартные погрешности, превышающие 1 °С и более, что обуславливает невозможность использовать такие данные в некоторых практических целях или при оценке климатических характеристик.

При давлении в стратосфере, превышающем примерно 30 гПа, точность измерения для большинства современных радиозондов аналогична точности

измерений в тропосфере, при давлении ниже 30 гПа погрешности результатов измерений для устаревших типов радиозондов с понижением давления быстро возрастают и в некоторых случаях теряют свою ценность.

Быстрое возрастание погрешностей измерения температуры с помощью радиозондов при очень низком давлении происходит в результате увеличения погрешностей в измерении температуры, связанных с инфракрасным и солнечным излучением в сочетании с быстрым возрастанием погрешностей в определении высот, на которых измеряется температура.

При очень низком давлении даже относительно небольшие погрешности в радиозондовых измерениях давления приводят к большим погрешностям в значениях высот и, следовательно, в сообщаемых значениях температуры.

Погрешности относительной влажности могут превышать, по меньшей мере, в два или три раза предельное значение погрешности при оптимальной работе приборов в случае высокой относительной влажности. Кроме того, погрешности в радиозондовых измерениях относительной влажности увеличиваются по мере понижения температуры. При использовании некоторых типов датчиков при температуре ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ погрешности могут превысить предельное значение, после которого данные измерений уже не имеют ценности.

В зависимости от измерения температуры, влажности и в некоторых случаях давления, изменяются погрешности и в значениях геопотенциальной высоты [3].

Контрольные вопросы

1. Что такое радиозонд?
2. Что является единицей геопотенциальной высоты, используемой при аэрологических наблюдениях?
3. Для чего необходимо высокое пространственное разрешение при измерениях вертикальной структуры атмосферы методом радиозондов?
4. Какой рабочий диапазон должен быть обеспечен при измерении метеорологических величин радиозондом?

5. Какие основные глобальные архивы данных радиозондирования можно выделить?

6. В какие сроки проводятся наблюдения с помощью свободнолетающих радиозондов?

7. Какие уровни считаются стандартными изобарическими поверхностями?

8. Какой критерий заключен в выборе особых точек?

2.2. Методы радиозондовых измерений

При изготовлении радиозондов необходимо находить определенные компромиссные решения. При измерениях температуры наиболее надежные результаты получают, когда датчики размещены над верхней поверхностью радиозонда, однако при таком размещении датчики подвергаются воздействию прямого солнечного излучения. В большинстве современных радиозондов применяется покрытие, позволяющее уменьшить нагревание датчиков температуры солнцем. В программном обеспечении для обработки данных предусмотрены поправки на остаточный разогрев Солнцем.

Почти для всех датчиков относительной влажности требуется некоторая защита от дождя. В то же время защитный экран уменьшает вентиляцию датчика и соответственно скорость реагирования всей системы датчиков в целом. Кроме того, защита становится источником искажения показаний датчика после прохождения зонда через облака. На практике требование о защите датчиков относительной влажности от дождя или льда является обычно более важным, чем требование о надлежащей вентиляции, поэтому для таких датчиков используются защитный экран.

Датчики давления (если они применяются в конкретном типе радиозонда) обычно устанавливаются внутри зонда, чтобы свести к минимуму изменения температуры в датчике во время полета и обеспечить оптимальное размещение датчиков температуры и относительной влажности.

К другим важным факторам, которые необходимо учитывать при изготовлении радиозондов, можно отнести их надежность, прочность, легкий вес и небольшие размеры. Учитывая доступность современных электронных средств, важно, чтобы датчики производили измерения с высокой скоростью. По мере возможности замер должен осуществляться приблизительно один раз в секунду, что соответствует замеру, как минимум, примерно через каждые 5 м по вертикали. Поскольку радиозонды обычно одноразовые, они должны быть достаточно дешевыми при массовом производстве. Простота и стабильность калибровки являются очень важным показателем, поскольку радиозонды приходится часто хранить на аэрологических станциях в течение продолжительных периодов времени (более года), прежде чем они будут использованы. Радиозонд должен передавать устойчивый сигнал на наземную станцию при наклонной дальности по меньшей мере 200 км [3].

Радиочастоты, используемые для передач информации с радиозондов. Полосы радиочастот, используемых в настоящее время для большинства передач с радиозондов: 400,15 – 406 МГц и 1668,4 – 1700 МГц. Эти полосы соответствуют распределению частот для метеорологических нужд, зафиксированному в Регламенте радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ). Большинство вторичных радиолокационных систем, производимых и эксплуатируемых в Российской Федерации, действуют в диапазоне радиочастот с центром на 1780 МГц.

Радиочастота, которая в действительности выбирается для эксплуатации радиозонда в той или иной географической точке, зависит от различных факторов. В тех местах, для которых характерны сильные ветры на высотах, наклонная дальность до радиозондов обычно большая и низкие углы места изменяются часто очень медленно. При таких обстоятельствах, как правило, выбирается полоса в 400 МГц, поскольку хорошей связи между радиозондом и наземной системой гораздо легче добиться на частоте 400 МГц, чем на частоте 1 680 МГц. Там, где ветры на высотах не столь сильны, выбор частоты в среднем определяется выбором метода, который используется для измерения ветра на высотах.

В некоторых странах национальные органы, ответственные за радиосвязь, выделяют часть полос радиочастот другим пользователям, поэтому любая организация, планирующая запуск радиозондов, должна удостовериться в том, что для их эксплуатации можно воспользоваться подходящими радиочастотами, а также что они не помешают работе радиозондов национальной метеорологической службы.

Контрольные вопросы

1. Какая защита необходима для датчиков относительной влажности?
2. Для чего датчики давления обычно устанавливаются внутри зонда?
3. Что необходимо учитывать при изготовлении радиозондов?
4. Какие частоты используют для передач информации с радиозондов?

2.3. Радиозонд

Базовая конструкция радиозонда состоит, как правило, из трех основных элементов: датчики (чувствительные элементы) плюс образцовый прибор, электронный преобразователь, преобразующий выходные сигналы с датчиков и образцовых приборов в электрические сигналы и радиопередатчик.

Радиозонды, как правило, должны обеспечивать измерение более одной метеорологической переменной величины. Для компенсации нестабильности при преобразовании выходных сигналов датчика в передаваемые сигналы используются образцовые сигналы.

Таким образом, следует производить переключение различных датчиков и образцовых устройств в соответствии с заранее определенным циклом. В большинстве современных радиозондов используются электронные переключатели, работающие с высокой скоростью при типичном цикле одного измерения, продолжающемся от одной до двух секунд. Такая скорость отсчетов

позволяет измерять метеорологические параметры с интервалом по высоте от 5 до 10 м при нормальной скорости подъема радиозонда [3].

Источники питания для радиозондов. Емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для того, чтобы обеспечивать питание радиозонда на протяжении всего времени его полета при любых условиях состояния атмосферы. Для подъема радиозонда на высоту с давлением 5 гПа емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для снабжения требуемыми токами в течение до трех часов, с учетом того, что подъемы часто могут затянуться и время полета может растянуться до двух часов. Три часа работы батареи могли бы потребоваться в том случае, когда должны использоваться данные, поступающие во время снижения радиозонда.

Батареи должны быть как можно более легкими и иметь длительный срок хранения. Кроме того, использованные батареи не должны представлять опасность для окружающей среды. Многие современные радиозонды могут в ходе полета выдерживать значительные изменения выходного напряжения. Обычно в радиозондах используют батареи двух типов: батареи с сухими элементами и водоналивные батареи. Преимущество сухих батарей заключается в том, что они легкодоступны по очень низкой цене, поскольку в большом количестве производятся по всему миру. Однако к их недостаткам относится ограниченный срок годности.

Методы передачи данных. В радиозондах используются передатчики самых разных конструкций. При частотах вплоть до 400 МГц используется, главным образом, полупроводниковые схемы, а при частоте 1680 МГц могут применяться ламповые (резонаторные) генераторы. В современных конструкциях передатчика обычно используется кварцевая стабилизация частоты для того, чтобы обеспечить хорошую стабильность частоты во время зондирования.

Хорошая устойчивость частоты во время подготовки зонда на земле перед запуском и в ходе полета, является очень важным фактором. При частоте 400 МГц предполагается широкое использование радиозондов с передатчиками, выходная мощность которых составляет менее 250 мВт. При частоте 1680 МГц

наиболее часто используются радиозонды с передатчиками мощностью примерно 330 мВт. Модуляция передатчика у разных типов радиозондов различается. Желательно, чтобы в будущем производители радиозондов стандартизировали передачу данных с радиозондов на наземную станцию.

Контрольные вопросы

1. Что входит в базовую конструкцию радиозонда?
2. Что является источником питания для радиозондов?
3. Какие методы передачи данных существуют в радиозондах?

2.3.1. Датчики температуры

Основные требования. Лучшие современные датчики температуры должны обладать такой инерцией на изменения температуры, при которой систематическое отклонение от тепловой инерции в ходе подъема радиозонда составляло бы менее $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при прохождении через любой слой толщиной 1 км. При типичной скорости подъема радиозонда это достигается в большинстве районов наблюдений в случае, когда величина постоянной времени датчика составляет менее 1 с на ранней стадии подъема. Кроме того, датчики температуры должны быть сконструированы таким образом, чтобы по мере возможности избежать погрешностей, возникающих при воздействии прямой или отраженной солнечной радиации или в результате теплообмена в инфракрасной части спектра. Погрешности, связанные с инфракрасным излучением, можно исключить путем использования покрытий для датчиков с низкой излучающей способностью в инфракрасной области спектра. К примеру, белые покрытия для датчиков обладают высокой излучающей способностью в инфракрасной области спектра. Измерения, проводимые этими датчиками, подвержены значительным погрешностям вследствие теплообмена в инфракрасной области спектра.

Датчики температуры должны быть также достаточно прочными для того, чтобы выдерживать резкие встряхивания во время запуска радиозонда, и достаточно стабильными для того, чтобы сохранять точную калибровку в течение нескольких лет. В идеале калибровка датчиков температуры должна достаточно легко воспроизводиться, чтобы можно было избежать индивидуальной калибровки датчиков. В качестве основных типов датчиков температуры, используемых на регулярной основе, можно назвать термисторы (керамические полупроводниковые термометры сопротивления), емкостные датчики, биметаллические датчики и термопары.

Термисторы обычно изготавливают из керамического материала, сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Датчики обладают высоким сопротивлением, которое изменяется в зависимости от температуры. Соотношение между сопротивлением R и температурой T может быть выражено приблизительно следующей формулой:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}$$

где A и B – постоянные величины. Хотя чувствительность к изменениям температуры очень высокая, реакция на изменение температуры далека от линейной.

Значение температурного коэффициента сопротивления термистора α_T может быть найдено из следующего выражения:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{B}{T^2}$$

Различают полупроводниковые термисторы, у которых $\alpha_T < 0$, и позисторы, у которых величина α_T может быть как положительной, так и отрицательной.

Поскольку сопротивление термистора является очень высоким и составляет обычно десятки тысяч ом, самонагревание от напряжения, подаваемого на датчик, пренебрежимо мало. Можно изготавливать очень маленькие термисторы и благодаря этому достигать малой инерционности.

Зависимость нагрева лучистым потоком Солнца применяемых в радиозондах современных термисторов от атмосферного давления (высоты подъема) характеризуется коэффициентом $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{гПа}$ [3].

Термоконденсаторы обычно изготавливаются из керамического материала, диэлектрическая проводимость которого изменяется при изменении температуры. В качестве керамического материала обычно используется бариево-стронциевый титанат. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости этого ферроэлектрического материала составляет порядка $10\text{--}2 \text{ } 1/^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент положителен при температурах ниже точки Кюри и отрицателен при температурах выше точки Кюри. Датчики теперь могут иметь диаметр примерно $0,1 \text{ мм}$. Они измеряют изменения емкости между двумя тонкими платиновыми проволоками, разделенными стеклокерамикой. Такой датчик обладает малой инерционностью и погрешностью, обусловленной нагреванием за счет солнечной радиации при уменьшении атмосферного давления, не превышает $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{гПа}$ [3].

Термопары. В некоторых видах радиозондов используется также датчик температуры с термопарой из меди и константана. Для внешнего соединения термопары используется проволока диаметром $0,05 \text{ мм}$, которая обеспечивают датчику возможность очень быстрого реагирования.

Соотношение между термоЭДС и разностью температур между датчиком и его эталоном является установленным физическим соотношением. Опорная термопара устанавливается внутри корпуса радиозонда в относительно стабильной температурной среде. Медный резистор используется для измерения этой эталонной температуры.

Размещение датчиков. Датчики температуры в радиозонде лучше всего размещать над корпусом радиозонда (под корпусом сбрасываемого зонда). Таким образом, воздух, нагреваемый или охлаждаемый при контакте с корпусом радиозонда или держателем датчика, не проходит впоследствии над датчиком. Для долгосрочной стабильности работы это местоположение датчика необходимо точно воспроизводить, и оно не должно изменяться от полета к

полету. Этого, как правило, можно достичь путем установки датчика на кронштейне, который поддерживает датчик в необходимом положении в течение всего полета. Для обеспечения хорошего обдува датчиков при низком давлении держатели датчиков и подходящие к ним токоподводы должны быть настолько тонкими, чтобы погрешностями, связанными с нагреванием или охлаждением при прохождении тепла через токоподводы, можно было пренебречь.

При таком методе размещения радиозондовые датчики температуры подвергаются непосредственному воздействию солнечного и инфракрасного излучения в атмосфере. Датчики поглощают солнечную радиацию при зондировании в дневное время и обмениваются длинноволновым излучением с Землей и атмосферой в любое время суток.

Величина погрешностей, связанных с излучением, лишь в незначительной степени зависит от размера и формы датчиков, поскольку размер датчика очень слабо влияет на коэффициент конвективной теплоотдачи. Таким образом, при малых размерах датчика погрешности, обусловленные излучением, будут малы лишь в том случае, когда покрытие датчика выбрано таким образом, чтобы обеспечить низкое поглощение как коротковолновой радиации, так и длинноволнового излучения. Необходимое покрытие можно получить путем нанесения надлежащего тонкого слоя металла. Для многих белых красок характерно высокое поглощение в инфракрасной области спектра, и они не являются идеальным покрытием для радиозондового датчика.

Еще одним следствием размещения датчика температуры над корпусом радиозонда является то, что при подъеме зонда сквозь атмосферные осадки или облако датчик может покрываться водой или льдом. Чрезвычайно важно, чтобы конструкция датчика предусматривала эффективный отвод воды или льда. Во-первых, испарение воды или льда с датчика при его попадании из облака в более сухие слои будет приводить к охлаждению датчика до температуры, которая ниже фактической температуры окружающей среды. Во-вторых, поглощающая способность датчика температуры в инфракрасной области спектра в случае, когда датчик остается покрытым льдом в ходе полета, отличается от обычной.

Таким образом, в данных измерений, полученных от покрытого льдом датчика, будет присутствовать аномальная систематическая погрешность в результате теплообмена в инфракрасной части спектра, особенно при низких давлениях.

Биметаллические датчики и их держатели поглощают слишком много излучения в дневное время, если установлены над радиозондами без надлежащей защиты. Поэтому датчики этого типа должны защищаться от излучения специальным экраном. Этот экран не должен пропускать к датчику как прямое, так и многократно отраженное излучение. На внутренних поверхностях защитного экрана температура должна оставаться близкой к действительной температуре атмосферы, и эти поверхности не должны влиять на температуру воздуха, попадающего на датчик. Защитный экран ни в малейшей степени не должен уменьшать вентиляцию датчика температуры и не должен захватывать воду или лед при подъеме радиозонда сквозь облака и атмосферные осадки.

Контрольные вопросы

1. Какие типы датчиков температуры используются в радиозондах?
2. Какие основные погрешности присущи датчикам температуры?
3. В чем заключается принцип работы термистора?
4. Как соотносится между собой сопротивлением R и температурой T в термисторах?
5. Как определить температурный коэффициент сопротивления термистора?
6. В чем заключается принцип работы термоконденсатора?
7. Из чего, как правило, изготавливают термоконденсатор?
8. При каких условиях меняется величина температурного коэффициента в термоконденсаторах?
9. Что такое термопара?
10. Какие условия необходимо соблюдать при размещении различных датчиков влажности на радиозонде?

2.3.2. Датчики давления

Радиозондовые датчики давления должны сохранять точность измерений в очень широком диапазоне – от 3 до 1000 гПа с разрешением в 0,1 гПа на большей части диапазона. Изменения давления определяются, как правило, по небольшому электрическому или механическому изменению.

Например, типичная максимальная деформация анероидной коробки составляет примерно 5 мм, так что преобразователь, используемый вместе с датчиком, должен обеспечивать разрешение смещения примерно в 0,5 мкм. Изменения калибровки, происходящие в результате изменений температуры датчика при подъеме радиозонда, также должны компенсироваться. Эти изменения температуры могут достигать нескольких десятков градусов, если только датчик давления не смонтирован в стабилизируемой среде.

В связи с этим датчики давления устанавливаются, как правило, внутри корпуса радиозонда с целью сведения к минимуму происходящих изменений температуры. В некоторых случаях датчик с целью уменьшения охлаждения окружают фольгированными пакетиками с водой. В тех случаях, когда используются водоналивные батареи, тепло, выделяемое такими батареями в результате химической реакции, используется для компенсации внутреннего охлаждения радиозонда. Однако даже при этом конструкция радиозонда должна обеспечить отсутствие градиентов температуры вокруг датчика и связанных с ним электрических компонентов. В случае, когда для датчика давления создается среда с активно контролируемой температурой, вся конструкция датчика должна быть смонтирована в таком положении на радиозонде, при котором тепловое искажение показаний датчика вследствие конструкции датчика давления не могло бы влиять на измерения температуры или относительной влажности.

Датчик давления и связанный с ним преобразователь конструируются, как правило, таким образом, что чувствительность увеличивается по мере падения давления. Величина постоянной времени радиозондовых датчиков

давления обычно очень мала, и погрешности, обусловленные инерцией датчика, незначительны.

Анероидные коробки используются в качестве датчика давления в большинстве радиозондов. В радиозондах более старых конструкций диаметр этих коробок, как правило, составлял приблизительно 50 – 60 мм. Датчики изготавливаются из металла, коэффициент упругости которого не зависит от температуры. Измерение деформации анероидной коробки может проводиться либо при помощи внешнего устройства, требующего механической связи между коробкой и радиозондовым преобразователем, либо при помощи внутреннего устройства. Чувствительность анероида зависит, главным образом, от активной площади поверхности коробки и от ее упругости. Коробки могут быть сконструированы таким образом, чтобы их деформация была линейно пропорциональна давлению или следовала бы какому-то другому закону, например приближалась к логарифмической зависимости от давления.

Долгосрочную устойчивость калибровки коробки можно повысить, многократно подвергая их изменениям давления и температуры по всему рабочему диапазону.

При использовании анероида с механической связью с преобразователем датчик обычно подвержен эффекту гистерезиса, равного примерно 1-2 гПа. Этот гистерезис необходимо принимать во внимание при калибровке датчика. Изменение давления в ходе калибровки должно быть такого же знака, как и изменение, происходящее в реальных условиях зондирования. Механическая связь с радиозондовым преобразователем часто представляет собой систему, усиливающую движение коробки с передачей на стрелку, приводящую в действие контакты переключателя или контакты, содержащие активные сопротивления. Для того чтобы действие было успешным, трение должно быть сведено к минимуму, чтобы избежать как прерывистости в движениях стрелки, так и гистерезиса в системе датчика.

Анероидные коробки (емкостные). Во многих современных конструкциях радиозондов используются анероидные коробки меньшего

диаметра (30 мм или даже меньше), причем деформация коробки измеряется непосредственно внутренним конденсатором. Используемый для этой цели электрический конденсатор состоит из двух параллельных пластин, каждая из которых закрепляется непосредственно на одной из сторон коробки. Емкость конденсатора C определяется по формуле:

$$C = \varepsilon \frac{S}{e}$$

где S – площадь поверхности каждой пластины, e – расстояние между пластинами, ε – диэлектрическая постоянная вещества между пластинами.

Поскольку e – прямая функция деформации коробки, емкость C – прямая электрическая мера этой деформации. Во многих радиозондовых датчиках каждая из пластин конденсатора зафиксирована на одной из противоположных сторон коробки при помощи креплений, проходящих через отверстия в другой пластине. При такой конфигурации e уменьшается при понижении давления.

Чувствительность будет самой высокой, когда e мало, а давление наименьшее. Описанный емкостный датчик более сложен в изготовлении, однако наилучшим образом подходит для измерений на высотах, поскольку его чувствительность может быть в 10 раз выше на уровне 10 гПа, чем на уровне 1000 гПа. Значение емкости, как правило, близко к 6 пФ.

Кремниевые датчики. Успехи в области использования кремния позволили в настоящее время изготавливать надежные датчики давления с использованием этого материала. В толстом слое полупроводника формируется небольшая полость. Эта полость покрывается очень тонким слоем кремния, и в ней сохраняется очень низкое давление. Эта полость затем выполняет функцию датчика давления. Чувствительным элементом служит тонкое кремниевое покрытие, которое прогибается в той или иной степени в зависимости от атмосферного давления. Метод определения прогиба кремниевого покрытия заключается в использовании емкостного датчика. В этом случае тонкий слой кремния над полостью покрывается тонким слоем металла, а второй слой металла используется в качестве эталонной пластины. Прогиб кремниевого покрытия определяется по изменению емкости между этими двумя слоями.

Датчики этого типа в гораздо меньшей степени зависят от температуры, чем датчики деформации, и сейчас широко используются. Поскольку датчик имеет очень маленький размер, это позволяет избежать погрешностей в калибровке, присущих более крупным емкостным анероидным датчикам и возникающих при полете радиозонда в результате изменений градиента температуры в анероидном датчике и в связанной с ним электронике.

Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления. Радиозонды с GPS, которые декодируют спутниковые сигналы глобальной системы позиционирования, могут предоставлять данные о геометрической высоте в отличие от первых радиозондов с GPS, которые не декодировали эти сигналы. Эти измерения геометрической высоты достаточно точны (их погрешность заключена в интервале от 10 до 20 м) для того, чтобы использоваться для расчета давления в заданное время полета зонда на основе данных наблюдений у поверхности за давлением, температурой и относительной влажностью. Рассчитанное значение давления будет более точным, чем измерения в стратосфере с помощью радиозондовых датчиков давления.

При определении координат радиозонда с помощью радиолокатора радиолокационные измерения высоты могут представлять собой альтернативный вариант измерениям с использованием радиозондового датчика давления, но эти высоты будут не столь же точны как те, что получены с помощью GPS радиозондов [3]. Тем не менее, такой метод широко распространен в России, в частности при определении высоты и параметров ветра на аэрологической станции АЭ «Саратов».

Погрешности в данных о высотах, полученных с помощью радиолокатора, зависят от установки и калибровки каждого конкретного радиолокатора.

Таким образом, значительно труднее добиться совместимости данных измерений геопотенциальной высоты и давления от станции к станции в рамках национальной сети аэрологических станций, которая зависит от радиолокационных измерений высоты, по сравнению с национальной сетью

станций, где используется определение высоты с помощью GPS или датчиков давления. Исключение из радиозондов, используемых GPS, датчика давления должно обеспечить значительное снижение стоимости радиозондов, однако необходимо учитывать потребности пользователей в данных для применяемых все чаще негидростатических моделей численных прогнозов погоды, поскольку непосредственное измерение в тропосфере давления и геопотенциальной высоты может давать некоторое преимущество в тех случаях, когда предположение о гидростатическом равновесии не соответствует атмосферным условиям.

Алгоритмы для расчета геометрической высоты по данным радиолокационных наблюдений за ветром с учетом наклонной дальности и угла места с последующим преобразованием геометрической высоты в геопотенциальную высоту используется практически на всех станциях сети Росгидромета. В случае, когда вместо данных наблюдений с помощью датчика давления используются данные радиолокационных наблюдений за высотой, необходимо перед расчетом значений давления откорректировать эти высоты с учетом влияния кривизны земного шара и рефракции радиоволн. Поправка на рефракцию может быть введена с использованием сезонных средних профилей атмосферы, однако для достижения оптимальной точности значений давления может понадобиться коррекция высоты с учетом условий, характерных для каждого индивидуального полета радиозонда.

Контрольные вопросы

1. В каком диапазоне датчики давления должны сохранять точность измерений?
2. С помощью чего можно повысить долгосрочную устойчивость калибровки анероидной коробки?
3. В чем заключается принцип работы анероидных емкостных коробок?
4. От чего зависит емкость конденсатора?
5. В чем заключается принцип работы кремниевых датчиков давления?
6. Как определяется высота радиозонда с помощью радиолокатора?

2.3.3. Датчики относительной влажности

Успешное функционирование радиозондового датчика относительной влажности зависит от скорости обмена молекулами воды между этим датчиком и атмосферой. В случае, когда датчик относительной влажности должен обеспечивать получение надежных данных при прохождении радиозонда сквозь тропосферу, он должен обеспечивать разрешение до одного процента для давления насыщенного водяного пара от 46 гПа при 30 °С до минимум 0,06 гПа при -50 °С. Для измерений при температуре ниже 0°С датчики относительной влажности должны быть откалиброваны таким образом, чтобы сообщать значение относительной влажности по отношению к поверхности воды.

Датчики относительной влажности нового поколения обеспечивают довольно хорошие результаты при температуре выше примерно -70 °С и дают сопоставимые профили относительной влажности.

Добиться удовлетворительной работы датчика относительной влажности при низких значениях температуры и давления зачастую чрезвычайно трудно. Если свободный обмен молекулами воды между датчиком и атмосферой затруднен при понижении температуры во время подъема радиозонда, то искажение показаний датчика, вызванное высокой концентрацией водяного пара на более ранних стадиях подъема, может привести к значительному систематическому отклонению в данных измерений при наиболее низких значениях температуры.

Инерционность датчика относительной влажности во время подъема радиозонда возрастает гораздо быстрее, чем инерционность датчика температуры.

Инерционность датчиков с животной пленкой при заданной температуре значительно возрастает при очень высокой или очень низкой относительной влажности. Угольные гигристоры устанавливаются обычно в радиозонде в специальной защите - шахте, а датчики с тонкой пленкой на кронштейне

радиозонда; последние защищаются колпачками от воздействия атмосферных осадков.

Проведенные недавно сравнения радиозондов не выявили какой-либо значительной разницы в инерционности большинства широко используемых тонкопленочных емкостных датчиков при температуре выше $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температуре ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ инерционность тонкопленочных емкостных датчиков обычно гораздо меньше, чем инерционность угольных гигросторов, и они становятся самыми используемыми датчиками относительной влажности почти во всех современных радиозондах. Емкостные датчики с тонкой пленкой могут иметь инерционность две минуты при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Калибровка большинства датчиков относительной влажности зависит от температуры. Для того чтобы точность, заявленная для данного датчика при комнатной температуре в лаборатории, сохранялась и при полете радиозонда через большую часть тропосферы, необходимо проводить коррекцию этой зависимости при обработке данных наземной системой.

Для большинства датчиков относительной влажности необходима защита от загрязнения атмосферными осадками на ранней стадии подъема радиозонда. Испарение осадков с защитных покрытий, внутренних поверхностей шахты или держателей датчика в начале полета также может привести к возникновению погрешностей в результатах наблюдений за относительной влажностью.

Ни один из датчиков относительной влажности, устанавливаемых на действующих радиозондах, не является достаточно надежным для обеспечения высококачественных измерений относительной влажности при низких значениях температуры и давления в стратосфере.

Емкостные тонкопленочные датчики используются в настоящее время в большинстве конструкций современных радиозондов. Наиболее известным и распространенным типом такого датчика влажности является модель Humicap финской компании Vaisala. На рисунке 5 изображена типичная схема датчиков данного вида.

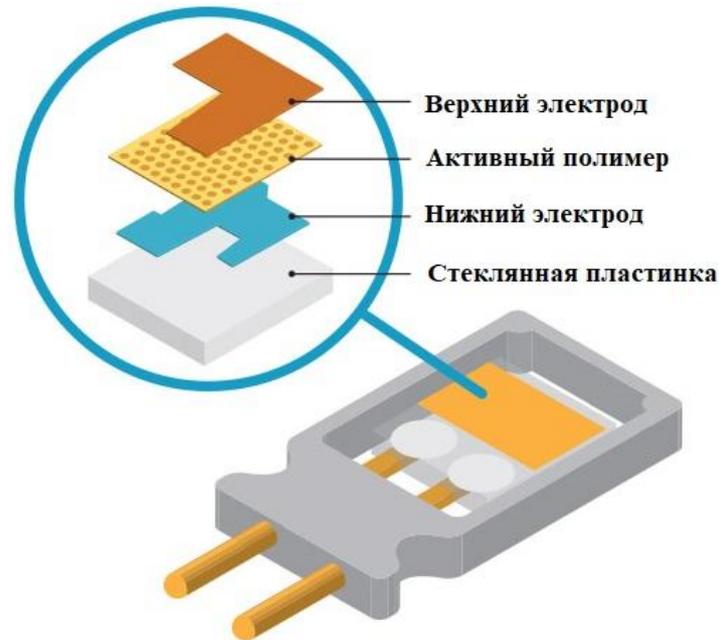


Рисунок 5 – Схема емкостного тонкопленочного датчика Humicap финской компании Vaisala [12].

Принцип действия первого широко используемого датчика основан на зависимости диэлектрической проницаемости полимерной пленки от давления водяного пара в окружающей среде. Нижний электрод конденсатора формируется путем протравливания покрытой металлом стеклянной пластинки (площадь ее обычно составляет 4 мм, а толщина – 0,2 мм), которая затем покрывается слоем активного полимера толщиной приблизительно 1 мкм. Верхний электрод из золота напыляется вакуумным методом на поверхности этого полимера и является проницаемым для водяного пара. Зависимость емкости датчика от относительной влажности представляет собой почти линейную функцию; зависимость калибровки от температуры незначительна [3].

Угольные гигристоры изготавливаются путем внедрения тонко измельченных частиц угля в гигроскопическую пленку. Современный вариант этого датчика представляет собой полистироловую ленту (примерно 1 мм толщиной, 60 мм длиной и 18 мм шириной), покрытую тонкой

гигроскопической пленкой, содержащей частицы угля. Вдоль каждой стороны этого датчика размещены электроды.

Изменение относительной влажности окружающей среды приводит к изменению размеров гигроскопической пленки, при этом по мере увеличения влажности возрастает сопротивление. Сопротивление при относительной влажности 90 % примерно в 100 раз больше, чем при относительной влажности 30 %. При обработке данных может проводиться коррекция с учетом температурной зависимости. Датчики обычно устанавливаются в шахте внутри радиозонда с целью сведения к минимуму влияния атмосферных осадков и предотвращения прямого нагревания датчика солнцем.

При качественном производстве этот тип датчиков имеет воспроизводимые калибровочные характеристики, поэтому зависимость датчиков от температуры не нужно определять на индивидуальной основе. Гигристоры следует подвергать, как правило, на месте их изготовления, воздействию многих сезонных циклов при разных значениях относительной влажности и комнатной температуре, с тем чтобы впоследствии уменьшить гистерезис в этом датчике при подъеме радиозонда.

Сопротивление датчика во время его изготовления может быть отрегулировано до стандартного значения путем удаления части угольного покрытия с пленки. В этом случае значению измеряемой величины могут соответствовать определенные стандартные значения сопротивления для конкретных условий, и датчики в радиозондах станут взаимозаменяемыми без необходимости дальнейшей калибровки. Этот датчик должен храниться в опечатанном виде вплоть до момента его использования, а во время установки этого датчика в радиозонде нельзя прикасаться к гигроскопической поверхности пленки. Трудно изготовить датчики, имеющие стабильную калибровку при высокой влажности, и воспроизводимость результатов измерений этими датчиками часто плохая при низкой влажности.

Датчики из животной пленки (пленка из брюшины быка) все еще используются в больших сетях. При изменении влажности от 0 до 100 % длина

элемента из животной пленки изменяется на 5–7 %. Хорошие результаты могут быть получены при температуре выше -20 °С, однако при более низкой температуре скорость ответной реакции датчиков становится чрезвычайно низкой. При низкой влажности датчики из животной пленки также испытывают отрицательные последствия значительного гистерезиса.

Животная пленка, используемая в датчиках влажности, должна быть однослойной и нелакированной, толщиной примерно 0,03 мм. Эта пленка должна быть закреплена с натяжением примерно в 20 г/см (на сантиметр ее ширины) и в таком натянутом состоянии должна быть выдержана в течение нескольких часов в насыщенной атмосфере. Для сведения к минимуму гистерезиса рекомендуется помещать датчик в насыщенную атмосферу на 20 минут как перед калибровкой, так и перед использованием. Калибровка должна проводиться в ходе цикла изменений относительной влажности при переходе от влажных условий к сухим. Во время полета радиозонда датчик должен быть защищен от воздействия дождя.

Датчики из животной пленки во время подъема радиозонда показывают заниженные при высокой влажности, завышенные – при низкой влажности, значения даже в нижней тропосфере [3]. На аэрологической станции АЭ «Саратов» использование таких датчиков прекратилось в 2014-2015 гг.

Размещение датчиков влажности. При подъеме радиозонда обычным является быстрое изменение относительной влажности с амплитудой более 25 %. Для точных измерений необходимо, чтобы датчики влажности хорошо вентилировались, а кроме того, были по возможности защищены от оседания на их поверхности или на их держателях воды или льда, а также от нагревания солнцем. Таким образом, датчики относительной влажности небольшого размера, такие как емкостные тонкопленочные датчики, устанавливаются на внешнем кронштейне. Датчик может накрываться небольшим защитным колпачком или датчик может периодически подвергаться нагреву для уменьшения искажения показаний датчика от воздействия воды или льда из облака или тумана. Конструкция защитного колпачка может иметь очень

большое значение, ведь необходимо, чтобы колпачок не мешал датчику влажности хорошо вентилироваться воздухом во время подъема радиозонда. К примеру, на рисунке 6 изображен малогабаритный радиозонд (МРЗ-3А) с пленочным датчиком влажности.



Рисунок 6 – малогабаритный радиозонд МРЗ-3А

1 – пленочный датчик влажности с защитной крышкой; 2 – датчики температуры;

3 – держатель (из пластмассы); 4 – радиоблок.

Малогабаритный радиозонд МРЗ-3А предназначен для температурно-ветрового зондирования. Данный тип радиозондов имеет следующие основные узлы (см. рисунок 6): радиоблок 4, преобразователь и электронный коммутатор, батарея (располагается в крышке радиозонда), датчик температуры (терморезистор) 2, датчик влажности (животная пленка) 1, пенопластовый корпус, держатель 3 и шнуры для сборки и подвешивания радиозонда. Данный тип радиозондов применялся на аэрологической сети СССР с 1986 года с использованием аэрологического информационно-вычислительного комплекса (АВК) [7]. Позже стал применяться в системе МАРЛ-А. На аэрологической станции МРЗ-3А с пленочным датчиком влажности применялся совместно с МАРЛ-А до 2014-2015 гг. Позже на смену пришли радиозонды с емкостными типами датчиков влажности.

Контрольные вопросы

1. Каким образом должны быть откалиброваны датчики относительной влажности для измерений при температуре ниже 0°C?
2. Какие виды датчиков влажности используются в радиозондировании?
3. В чем заключается принцип работы емкостных тонкопленочных датчиков?
4. Как выглядит схема емкостного тонкопленочного датчика влажности Humicap финской компании Vaisala?
5. В чем заключается принцип работы угольных гигристоров?
6. В чем заключается принцип измерения влажности пленочным датчиком?

2.4. Современные наземные радиолокационные станции

Детали конструкции наземного оборудования радиозондовой станции зависят от того, какой тип радиозондов используется. Тем не менее, в оборудование наземной станции всегда входят следующие элементы:

- 1) антенна и радиоприемник для приема сигналов с радиозонда;
- 2) оборудование для декодирования модуляции радиозондовых сигналов и для преобразования этих сигналов в метеорологические величины;
- 3) оборудование для представления данных метеорологических измерений оператору таким образом, чтобы можно было передавать пользователям необходимые сообщения в соответствии с требованиями [3].

В середине 1990-х создалась ситуация значительного отставания в развитии средств радиозондирования от мирового уровня. Несмотря на экономические трудности был создан радиолокационный комплекс температурно-ветрового зондирования атмосферы нового поколения, в которую входил малогабаритный радиолокатор «БРИЗ», изображенный на рисунке 7 [1].

«БРИЗ» - аэрологическая радиолокационная станция предназначена для работы в составе системы сетевого радиозондирования атмосферы, а также может применяться и для зондирования атмосферы в научных и специальных целях [13].

В конструкции новой РЛС были применены технологические решения, основанные на современных достижениях СВЧ радиотехники и электроники, широком использовании микропроцессорных средств цифровой обработки информации и управления комплексом.

Конструкция РЛС была совершенно оригинальной, заимствовала от прототипа РЛС АВК-1 только одну деталь – оптическую трубу для юстировки координат по азимуту и углу места.



Рисунок 7 – Радиолокационная станция «БРИЗ», июль 2001 г.,
обсерватория Верхнее Дуброво [1].

Отличительными особенностями новой РЛС явились значительное снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления (в 15 – 20 раз) и построение системы полностью на современной полупроводниковой элементной базе. Широкое применение нашли методы цифровой обработки и управления. Мощность излучения передатчика РЛС была снижена в 100 раз при сохранении оперативного радиуса действия системы в 250 км.

В 1999 году по заказу Гидрометслужбы Республики Беларусь был изготовлен и поставлен опытный образец аэрологической РЛС «БРИЗ» в г. Брест.

Станция позволяет обеспечить автоматический контроль функционирования, предполетную проверку радиозонда, автоматическое сопровождение радиозонда в полете, прием и обработку координатно-телеметрической информации, вычисление метеорологических величин, составление и передачу телеграмм с данными зондирования в стандартных кодах КН-04, «Слой», «Шторм» и «Приземный слой».

В 2002 году в г. Екатеринбург начаты работы по созданию усовершенствованного аэрологического радиолокационного вычислительного комплекса (АРВК) «Вектор-М», который относится к классу цифровых систем радиозондирования атмосферы с автоматической обработкой данных. АРВК «Вектор-М» предназначен для проведения температурно-ветрового зондирования атмосферы путем выпуска и сопровождения радиозонда в режиме свободного полета.

В октябре 2006 года рабочий образец комплекса был поставлен на опытную эксплуатацию на аэрологической обсерватории г. Омска и также стал выдавать информацию в мировую сеть аэрологических данных. В течение 2007-2008 гг. по заказу Росгидромета было изготовлено 30 штук РЛС «Вектор-М», которые в настоящее время эксплуатируются на аэрологической сети России.

Уровень автоматизации системы позволяет осуществлять автоматический контроль функционирования системы, обеспечивающий автоматическую проверку характеристик антенной системы и следящего привода; дистанционное управление системой одним оператором (рабочее место оператора на основе персонального компьютера); автоматическую обработку вторичной метеоинформации и выдачу по каналам связи метеобюллетеней, а также сохранение аэрологических данных и метеотелеграмм в архиве для дальнейшего анализа [14].

Создание аэрологического радиолокатора со средней мощностью излучения менее мощности сотового телефона (0,1 Вт) при обеспечении оперативной дальности не менее 250 км, конечно же, было значительным достижением [1].

Стоит отметить, что сотрудниками ЦАО Росгидромета был разработан радиолокатор МАРЛ. Радиолокационная система МАРЛ-А с 2008 года функционирует на аэрологической станции АЭ «Саратов», более подробное описание которого будет представлено в разделе 3 данного учебно-методического пособия.

Станции МАРЛ-А, также, как и «Вектор-М» отличаются принципиально новым подходом к конструированию подобных комплексов. Эта новизна выражается в построении станции в виде одноблочной конструкции с максимальным упрощением механических и сборочных работ при производстве и исключением из производственного цикла работ по изготовлению точной механики.

В основу АРВК МАРЛ-А положено использование персональной ЭВМ с программной реализацией большинства узлов радиолокатора, что делает его конструкцию гибкой, легко адаптирующейся к изменениям условий эксплуатации. Результаты зондирования могут быть направлены потребителям по любым каналам связи.

Первый такой радиолокатор запущен в работу на аэрологической станции в Ростове-на-Дону в 2001 году. К настоящему времени на сети установлено уже более 50-ти АРВК МАРЛ-А. Радиолокаторы МАРЛ-А используются в Казахстане, а также ими оснащен космодром Байконур [1].

Контрольные вопросы

1. Какие элементы входят в оборудование наземной станции?
2. Какие современные системы радиозондирования можно выделить?

3. Какие основные функциональные возможности радиолокационной станции «БРИЗ»?

4. Какие системы радиозондирования наиболее распространены на сети Росгидромета?

5. Как расшифровывается аббревиатура МАРЛ-А?

6. Где впервые была установлена система слежения за радиозондом МАРЛ-А?

7. Какие стандартные коды используются для передачи аэрологической информации?

2.5. Предполетная проверка и эксплуатация радиозондов

Эксплуатация радиозондов. Перед запуском радиозонда рекомендуется провести проверку точности радиозондовых измерений в контролируемой среде. Эти контрольные проверки должны проводиться в отношении уже готовых к полету радиозондов за несколько минут до их запуска. Задача при этом заключается в предотвращении запуска неисправных радиозондов. Следующая задача может заключаться в повышении точности калибровки путем коррекции небольших изменений в калибровке, которые могли произойти во время транспортировки радиозонда к месту запуска и во время хранения.

Эти контрольные проверки проводятся обычно в помещении. Они могут проводиться в вентилируемой камере с образцовыми датчиками температуры и относительной влажности. Затем может быть проведена проверка относительной влажности в условиях влажности окружающей среды и в случае необходимости при более низкой и более высокой влажности.

При отсутствии образцового психрометра можно получить известные значения влажности с помощью насыщенных солевых растворов или силикагеля.

Расхождения между данными радиозондовых измерений и показаниями контрольных приборов могут быть использованы для коррекции характеристик калибровки датчиков до полета. Датчики, используемые для контроля

радиозондов, должны регулярно проверяться, чтобы избежать долговременного дрейфа их калибровки. Надлежащая коррекция калибровки радиозондов при помощи программного обеспечения обычно позволяет в некоторой степени улучшить воспроизводимость результатов радиозондовых измерений в ходе полета. Тип необходимой коррекции будет зависеть от причин изменения калибровки после первоначальной калибровки, проводившейся при изготовлении радиозонда, и будет изменяться в зависимости от типа радиозонда.

При обнаружении больших расхождений с контрольными измерениями радиозонд может быть забракован как не отвечающий спецификации его изготовителя и возвращен для замены. Максимально допустимые расхождения при наземных проверках должны согласовываться с изготовителем радиозондов при их приобретении.

Представляется целесообразным осуществлять контроль за работой радиозонда после его доставки на площадку для запуска. Сообщения с радиозонда должны быть проверены на совместимость с результатами приземных наблюдений на станции непосредственно перед запуском.

Методы запуска радиозондов. Радиозонды обычно запускаются с помощью газонаполненной оболочки, поднимающейся со скоростью от 5 до 8 м/с, в зависимости от спецификации и характеристик используемой оболочки.

Такая скорость подъема позволяет проводить измерения своевременно: радиозонду требуется примерно 40-50 минут, чтобы достичь высоты 16 км, и примерно 90-100 минут, чтобы достичь высоты более 30 км – таким образом, информация может быть быстро передана в центры прогнозирования.

Информация с радиозонда поступает на наземную станцию, которая обычно располагается на постоянном месте. Однако современные технологии позволяют создавать полностью автоматизированные радиозондовые наземные системы очень маленького размера. Поэтому в настоящее время наземные системы легко разместить в качестве подвижных систем на морских судах или в небольших автофургонах или трейлерах на суше.

При сбрасывании радиозондов с исследовательских воздушных судов используются парашюты, которые позволяют замедлить их спуск. Датчики температуры монтируются внизу сбрасываемого радиозонда. Скорость спуска обычно составляет около 12 м/с, что позволяет завершить измерение сбрасываемым радиозондом примерно за четверть часа.

Благодаря высокой скорости спуска одно воздушное судно имеет возможность сбросить достаточное число радиозондов на надлежащем расстоянии друг от друга по горизонтали (менее 50 км) для проведения мезомасштабных исследований. Сообщения, передаваемые со сбрасываемых радиозондов, могут приниматься и обрабатываться на воздушном судне.

Разрабатываемые в настоящее время системы смогут принимать и передавать прямые показания, а также действовать в автоматическом режиме под контролем программы. Кроме того, разрабатываются системы, позволяющие использовать для сбрасывания радиозондов дистанционно пилотируемые воздушные транспортные средства.

Процедуры запуска радиозонда. После того как радиозонд подготовлен к запуску, следует провести проверку, сравнив данные метеорологических измерений с помощью радиозонда с данными приземных измерений либо внутри камеры для калибровки, либо снаружи, в вентилируемой метеорологической будке. Необходимость такой проверки обусловлена тем, что радиозонд мог быть поврежден во время его транспортировки с места изготовления или не был надлежащим образом изготовлен, или калибровка датчиков могла измениться во время хранения. Если погрешности измерения с помощью радиозонда превышают пределы, указанные в контракте на его приобретение, следует вернуть его изготовителю для замены.

Радиозонды обычно запускают вручную или с использованием вспомогательного устройства для запуска из какого-либо ангара (газогенераторной) или контейнера.

Сложность устройства ангара и процедуры запуска зависят от того, какой газ используется для наполнения шара, и от скорости и направления

приземного ветра в месте запуска. В случае запуска при сильном ветре в качестве вспомогательного средства используется размотчик, который замедляет высвобождение идущего к радиозонду соединительного шнура во время запуска. При очень сильном приземном ветре требуются такие размотчики, которые высвобождают соединительный шнур со скоростью 0,5–1 м/с.

Существуют также автоматические системы для запуска радиозондов. Эти системы могут оказаться экономически выгодными на тех радиозондовых станциях, на которых персонал используется исключительно для работы с радиозондами. Однако эти системы могут оказаться непригодными для работы в тех местах, где обычно наблюдается очень сильный приземный ветер.

Подвеска радиозонда во время полета. Во время полета радиозонд не должен быть подвешен слишком близко к газонаполненной оболочке. Это условие необходимо соблюдать потому, что оболочка является источником искажений показаний датчика при измерениях температуры и относительной влажности. Во время подъема оболочки позади неё идет струя, воздух в которой нагревается в контакте с поверхностью оболочки в дневное время и охлаждается в некоторой степени в ночное время. Воздух в тепловом следе за оболочкой может также быть загрязнен водяным паром с поверхности оболочки после того, как она прошла сквозь облака. Длина подвески, которая позволяет предотвратить воздействие значительного искажения показаний датчика от идущей за оболочкой струи на радиозондовые измерения, зависит от максимальной высоты наблюдений. Это связано с тем, что воздух, остающийся за газонаполненной оболочкой, при очень низких давлениях нагревается или охлаждается сильнее. Для предотвращения значительных погрешностей измерений при подъеме радиозонда до 20 км достаточной является подвеска длиной 15-20 м. Однако если радиозонд поднимается на высоту 30 км или выше, то более приемлемой будет подвеска длиной примерно 30-40 м [3].

Обеспечение безопасности населения во время падения радиозонда. Конструкция радиозондов (размер, масса и плотность) должна соответствовать существующим правилам безопасности воздушного движения. Указанные

параметры должны быть такими, чтобы радиозонд не мог причинить значительного ущерба при столкновении с воздушным судном или при всасывании его двигателем воздушного судна. Во многих странах национальные органы по управлению воздушным движением издают правила, регулирующие использование шаров-зондов, находящихся в свободном полете. Часто требуется официальная регистрация мест для запусков шаров-зондов в органах, контролирующих воздушное движение. В некоторых местах запуски шаров-зондов могут быть вообще запрещены или возможны лишь при получении специального разрешения у органов, контролирующих воздушное движение. Перед тем как организовывать новый пункт наблюдения, необходимо проверить возможность санкционирования там запусков радиозондов.

В некоторых странах правила безопасности требуют, чтобы к подвеске радиозонда были также прикреплены парашют или другие средства, уменьшающие скорость его спуска после разрыва шара. Это необходимо для защиты населения от телесных повреждений. Парашют должен уменьшать скорость спуска около поверхности земли до 6 м/с и менее [3]. Так, на практике работы аэрологической станции АЭ «Саратов», не было официальных случаев нанесения ущерба, в результате падения радиозонда после разрыва оболочки. Хотя был случай, когда Саратов находился в центре антициклона и радиозонд практически не смещался по горизонтали. После того, как лопнула оболочка, радиозонд упал в 4-х км от его выпуска (об этом сообщил очевидец, на чью придомовую территорию упал прибор).

Остатки газонаполненной оболочки после её разрыва уменьшают скорость спуска на более низких уровнях. Однако при определенных обстоятельствах большая часть оболочки после её разрыва отделяется от оснастки радиозонда, и если не использовать парашют, то скорость спуска в этом случае будет слишком высокой.

Важно также обеспечить безопасность радиозондов для окружающей среды после того, как они упадут на поверхность Земли или в океан, независимо от того, подберут ли их люди, животные или они будут просто разрушаться.

Контрольные вопросы

1. Что включает в себя контрольная проверка радиозонда?
2. Что необходимо предпринять при обнаружении больших расхождений показаний радиозонда с контрольными измерениями?
3. Какие существуют методы запуска радиозондов?
4. Что иногда используют в случае запуска при сильном ветре в качестве вспомогательного средства?
5. На каком расстоянии подвешивается радиозонд к оболочке во время полета?
6. Какие меры предосторожности применяются в случае падения радиозонда после разрыва оболочки?

3. Основные принципы работы аэрологического лоатора МАРЛ-А

На протяжении ряда лет Центральная аэрологическая обсерватория ведет разработку новых радиолокационных систем для нужд метеорологических служб России. В 1997 году был разработан микроэлектронный аэрологический радиотеодолит (МАРЛ-Т), опытный образец которого успешно прошел межведомственные приемочные испытания и был рекомендован для серийного производства. Разработка МАРЛ-Т показала, что и на современном этапе развития электроники в России могут быть созданы конкурентоспособные радиолокационные системы, не уступающие зарубежным аналогам, и существенно превосходящие станции типа АВК-1.

Для того, чтобы обеспечить возможность работы с серийно выпускаемыми для сети аэрологического зондирования России и стран ближнего зарубежья радиозондами МАРЗ и МРЗ-3 было решено разработать на базе МАРЛ-Т активную (в отличие от неизлучающего радиотеодолита) радиолокационную станцию, получившую обозначение МАРЛ-А.

Станции МАРЛ-Т и МАРЛ-А отличаются принципиально новым подходом к конструированию подобных комплексов. Это выражается в построении станции в виде одноблочной конструкции с максимальным упрощением механических и сборочных работ при производстве и исключением из производственного цикла работ по изготовлению точной механики для системы сопровождения радиозонда. Использование современных микроэлектронных и цифровых технологий и тщательно продуманные конструктивные решения позволили создать полностью автоматизированную и не требующую технического обслуживания высококвалифицированным персоналом систему радиозондирования, способную работать в любых климатических условиях [15].

Назначение радиолокационной станции МАРЛ-А. Микроэлектронный аэрологический радиолокатор (МАРЛ-А) предназначен для выполнения совместно с радиозондом комплексного зондирования атмосферы.

Выпускаемый в свободный полет радиозонд измеряет в точке пролета температуру и влажность атмосферы и по каналу радиосвязи передает эти параметры на радиолокационную станцию слежения МАРЛ-А. Станция МАРЛ-А производит автоматический поиск и сопровождение зонда в полете с выдачей его текущих координат, прием и обработку метеорологической информации. С помощью МАРЛ-А осуществляются также предполетная проверка радиозонда с представлением результатов на мониторе компьютера оператора [15].

Технические данные МАРЛ-А. Дальность автоматического сопровождения зонда: от 100 м до 200 км; высота комплексного зондирования до 40 км.

В качестве антенны используется активная фазированная антенная решетка (АФАР). Пример АФАР представлен на рисунке 8.

Пределы поворота диаграммы направленности антенны (ДН):

- в горизонтальной плоскости $\pm 360^\circ$ (механический поворот) и электронное сканирование в секторе $\pm 25^\circ$;
- в вертикальной плоскости электронное сканирование в секторе от -10° до 100° .

Максимальная скорость механического поворота АФАР 60 град/с.

Ширина ДН АФАР:

- в горизонтальной плоскости не более 9° ,
- в вертикальной плоскости не более 6° .

Мощность передающей части АФАР в импульсе 115 Вт, длительность импульса 0,5 мкс в ближней зоне и 1-1,1 мкс в дальней зоне.

Среднеквадратические значения ошибок измерения координат зонда:

- дальности не более 30 м;
- по угловым координатам не более $0,1^\circ$.



Рисунок 8 – Установка антенны АФАР на крыше аэрологической станции
АЭ «Саратов» в 2008 году

Абсолютная погрешность измерения телеметрической информации (погрешность измерения периода частотной манипуляции сигнала зонда) не более 1 мкс.

МАРЛ-А обеспечивает сопровождение радиозонда при следующих условиях:

- скорости подъема зонда до 12 м/с;
- скорости падения зонда до 125 м/с.
- скорости горизонтального перемещения зонда у земной поверхности до 35 м/с и на высотах более 10 км – до 150 м/с.

Система индикации и управления радиолокатором включает в себя персональный компьютер (ПК) оператора (информация о режимах работы, координатах зонда, исправности аппаратуры). Предусмотрен режим функционального контроля радиолокатора с использованием имитатора радиозонда.

Система зондирования атмосферы состоит из радиолокатора МАРЛ-А и радиозонда МРЗ-3 (и других типов радиозондов), привязанного к

наполненному водородом шару (находящемуся в свободном полете). Зонд излучает импульсно модулированный сигнал. Несущая частота от 1672 МГц до 1688 МГц, длительность импульса примерно равна 0,6 мкс, среднее значение периода следования импульсов составляет $T_{сл.з} \approx 1,25$ мкс (среднее значение частоты следования импульсов 800 кГц). Принимая сигнал радиозонда моноимпульсной антенной, можно измерять его текущие угловые координаты. Для измерения дальности зонда в состав МАРЛ-А включен передатчик запросного сигнала. Когда запросный импульс достигает зонда, в сигнале последнего возникает пауза длительностью $T_{сл.з}$, т. е. пропускается один импульс. Определяя задержку этой паузы t_3 относительно импульса передатчика РЛС, можно получить текущую дальность зонда R :

$$R = C \frac{t_3}{2}$$

где C – скорость распространения радиоволн [15].

Порядок проведения радиозондирования на аэрологической станции

АЭ «Саратов» в летний период времени

Аэрологическое наблюдение включает следующие операции:

-предполетную проверку радиозонда и наземных технических средств;

-подготовку радиозонда к выпуску: сборку, контрольную проверку перед выпуском, наполнение оболочки;

-выпуск радиозонда, одновременно с которым проводятся наземные метеорологические наблюдения;

-сопровождение радиозонда в полете, прием и обработку сигналов; чешской телеграммы;

-анализ результатов радиозондирования и составление аэрологической телеграммы [16].

Наземные метеорологические наблюдения. В момент выпуска радиозонда в полет на АЭ «Саратов» производят измерения наземных значений температуры, влажности воздуха, давления, скорости и направления ветра. Определяют также количество и форму облаков. Результаты этих наблюдений заносят в таблицу результатов радиозондирования и в аэрологическую телеграмму в качестве данных радиозондирования и у поверхности Земли (на уровне станции).

Если аэрологическая и метеорологическая станции расположены рядом (как например в Саратове), наземные измерения давления, температуры, влажности, направления и скорости ветра, а также определение параметров облаков осуществляют на метеостанции. Отсчеты значений метеорологических величин должны производиться в срок выпуска по запросу аэрологов. Допустимое расстояние между местом выпуска радиозонда и территорией метеоплощадки не превышает 500 м.

Если расстояние до метеорологической станции превышает 500 м или она отсутствует, метеорологические величины измеряют непосредственно на АЭ.

Наземные значения температуры и влажности воздуха измеряют аспирационным психрометром Ассмана, который устанавливают в вентилируемой будке в вертикальном положении с помощью специального зажима.

Наземное атмосферное давление измеряют с помощью барометра станционного с точность отсчета 0,1 гПа [16].

Предполетная проверка радиозондов. Контрольную проверку радиозонда перед выпуском производят с целью определения его работоспособности и годности для измерения температуры и влажности при радиозондировании атмосферы, поскольку неблагоприятные условия транспортировки или неправильное хранение могут изменить его метеорологические характеристики.

Контрольную проверку радиозонда производят в вентилируемой будке с блоком вентилятора для создания искусственной вентиляции радиозонда со скоростью воздушного потока сверху вниз не менее 4 м/с.

За 20 мин до выпуска собранный и подготовленный к работе радиозонд переносят в вентилируемую будку и подвешивают в вертикальном положении так, чтобы датчик температуры находился на одном уровне и достаточно близко (на расстоянии 3-5 см) к резервуарам термометров психрометра. Одновременно включают вентиляцию воздуха в будке.

В это же время включают и подготавливают к работе РЛС комплекса типа МАРЛ-А. Оператор РЛС наводит антенну на радиозонд и производит подстройку РЛС по сигналу радиозонда, фиксирует появление устойчивых сигналов радиозонда, индикацию метеорологических импульсов и соблюдение последовательности передачи телеметрических сигналов в цикле.

Оператор РЛС записывает переданные ему значения метеорологических величин, данные об облачности, атмосферных явлениях и ветре.

Значения метеорологических характеристик радиозонда по температуре и влажности должны находиться в пределах установленных допусков [16].

Выпуск радиозонда. Для выпуска в свободный полет радиозондов следует использовать латексные оболочки, наполненные водородом. Норма наполнения оболочек (подъемная сила, которая определяется грузом, уравнивающим наполненную водородом оболочку) должна обеспечить такую скорость подъема радиозонда, при которой он достигает уровня 100 гПа примерно через 50-60 мин после выпуска, т. е. 300-320 м/мин.

Оболочку следует наполнять не ранее чем за 15 мин до выпуска. Перед наполнением оболочку следует осторожно положить на кусок брезента или хлопчатобумажной ткани, привязать аппендикс к штуцеру шланга и подвесить соответствующий груз. Наполнение оболочки должно производиться медленно слабой струей водорода. Когда оболочка наполнена примерно наполовину, следует закрыть вентиль баллона и проверить, не вытекает ли газ из оболочки. При отсутствии дефектов продолжают наполнять оболочку до установленной нормы, затем закрывают вентиль и вновь слушают, нет ли утечки газа. Снимают оболочку со штуцера шланга и завязывают аппендикс куском шнура.

Годный по результатам проверки радиозонд подвешивают к оболочке с помощью шнура длиной от 10 до 20 м, в зависимости от наземных погодных условий.

Радиозонд с оболочкой переносят на площадку для выпуска.

Получив по связи подтверждение оператора о готовности РЛС к выпуску, аэролог передает по связи команды: ПРИГОТОВИТЬСЯ. ВНИМАНИЕ, выбирает удобный момент и выпускает радиозонд в свободный полет, одновременно передавая команду ПУСК.

Если по каким-либо причинам выпуск радиозонда сорвался, повторный выпуск можно осуществить после получения разрешения на его проведение и при условии, что будут выполнены все операции, связанные с проверкой радиозонда. Время повторного выпуска радиозонда не должно выходить за пределы одного часа от основного срока наблюдения [16].

Сопровождение радиозонда в полете Сопровождение радиозонда типа МРЗ сводится к периодическому контролированию автоматической работы комплекса МАРЛ-А [16].

Результаты радиозондирования. Результатами радиозондирования являются вертикальные профили значений метеорологических величин на различных уровнях в атмосфере, измеренные с дискретностью, удовлетворяющей запросам различных потребителей аэрологической информации.

Результаты аэрологического наблюдения состоят из трех групп данных:

- данные на стандартных изобарических поверхностях: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 5 гПа;

- данные на стандартных высотах над поверхностью Земли (0,3; 0,6; 0,9 км) и над уровнем моря (0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 км и далее через 1 км до конца подъема радиозонда);

- данные на высотах особых точек, соответствующих резким изменениям (изломам кривой) в вертикальном распределении температуры, влажности, скорости и направления ветра.

К особым точкам по температуре относятся: уровень АЭ – поверхность земли (АЭ «Саратов расположена на высоте 166 метров выше уровня моря) и конечная высота радиозондирования, точки резкого уменьшения или увеличения вертикального градиента температуры и границы слоев изотермии (температура с высотой не изменяется) или инверсии (температура с высотой повышается). Резкие изломы считаются особыми точками в том случае, когда они обозначают границы слоев, продолжительность регистрации которых не менее 30 с, толщина не менее 150 м или 20 гПа при условии, что нижняя граница слоя находится ниже уровня 300 гПа. Нижняя и верхняя границы тонких слоев (толщиной менее 20 гПа) температурной инверсии при перепадах температуры более 2,5 °С включаются в особые точки при условии, что нижняя граница этого слоя также находится ниже уровня 300 гПа или первой тропопаузы.

Особыми точками по относительной влажности являются границы слоя с относительной влажностью, равной 100 % и точки резких изменений относительной влажности. Тонкие слои изменения влажности включаются в особые точки при условии, если внутри них перепад относительной влажности превышает 20 % и основание этого слоя находится ниже уровня 300 гПа.

Особыми точками по ветру являются: уровень АЭ, конечная высота подъема, точки резкого изменения скорости или направления ветра.

Уровень максимального ветра определяется как уровень, расположенный выше стандартной изобарической поверхности 500 гПа, на котором скорость ветра, превышая 30 м/с, больше, по крайней мере, на 10 м/с значений скорости ветра, наблюдаемых в слоях на 2 км выше и 2 км ниже выбранного уровня.

Вся информация, полученная в процессе радиозондирования, зашифровывается автоматически в аэрологические сообщения (телеграммы) с помощью специального программного обеспечения.

В настоящее время на территории России для передачи телеграмм используется специальный код КН-04. Он имеет кодовую форму, подразделяющуюся на четыре части - А, В, С, D и десять разделов. В частях А и С сообщаются данные на стандартных изобарических поверхностях, в частях В и D – данные на уровнях особых точек в профилях температуры, влажности и ветра [8]. При этом части А и В должны содержать данные до уровня 100 гПа включительно, а части С и D – выше этого уровня [16].

Требования безопасности при эксплуатации МАРЛ-А. МАРЛ-А размещают на плоском участке крыши или вышка с целью исключения помех при сопровождении радиозонда в первые минуты подъема и обеспечения минимальных углов закрытия горизонта (не более 3-40). Для безопасности операторов, работающих с МАРЛ-А, этот участок крыши должен иметь ограждение.

Рабочее место оператора МАРЛ - А должно быть оснащено средствами тушения пожара, личной гигиены, медицинской аптечкой т.д.

К эксплуатации и обслуживанию МАРЛ-А допускаются лица не моложе 18 лет, изучившие аппаратуру, техническую документацию и руководство по эксплуатации МАРЛА, прошедшие инструктаж по технике безопасности. Для работы с программным пакетом.

В процессе работы операторы АЭ «Саратов» используют для наполнения оболочек компримированный (сжатый) водород в баллонах.

Водород горюч и в смеси с воздухом взрывоопасен, поэтому для обеспечения безопасности при работе с водородом и при использовании сжатого водорода, поставляемого в баллонах, необходимо строго соблюдать технику безопасности на станции. Строго запрещается наполнять оболочку вблизи огня, курить в газогенераторном помещении. Баллоны и наконечник шланга должны быть тщательно заземлены. Не допускается быстро открывать вентиль при наполнении оболочек. Запрещается бросать и ударять баллоны, а также перекатывать их по земле [16].

Рекомендация: перед посещением аэрологической станции АЭ «Саратов» желательно прослушать лекцию Ефимова А.А. «Эксплуатация МАРЛ», которая доступна на сайте Виртуальной лаборатории «Методы и средства гидрометеорологических измерений» (<http://tech.meteorf.ru>) в разделе «Автоматизированные системы».

Заключение

За девяносто лет своего развития радиозондирование атмосферы прошло целый ряд качественных этапов, которые характеризовались увеличением высоты, автоматизации измерений и обработки данных. За эти годы метод радиозондирования атмосферы претерпел огромные изменения – от приема информации на слух, громоздкой ручной обработки и передачи данных до полностью автоматического приёма, обработки и отправки аэрологических сообщений в специализированные каналы связи. Радиозонд прошёл путь от прибора весом около 2-х кг до миниатюрного устройства легче 200 г.

Перспективы дальнейшего развития техники радиозондирования, прежде всего, связаны с совершенствованием существующей аппаратуры, отдельных её элементов и узлов. Целью их обычно являются повышение точности измерений, снижение эксплуатационных затрат, улучшение технических характеристик, удобства обслуживания и пр.

Другим перспективным направлением в настоящее время является создание и внедрение системы радиозондирования, построенной на основе спутниковых радионавигационных систем GPS [1]. Подобные системы в начале 1990-х годов были разработаны зарубежными фирмами Air, Vaisala и Graw. Эти станции имеют принципиальные преимущества по экономичности, габаритам, мобильности, и использованию на подвижных объектах [1].

Для более глубокого изучения вопросов, связанных с радиозондированием атмосферы, читатель может использовать сайт курса «Методы зондирования окружающей среды» (<https://sites.google.com/view/remote-sensing/>) и сайт Виртуальной лаборатории «Методы и средства гидрометеорологических измерений» (<http://tech.meteorf.ru>).

Автор выражает искреннюю благодарность лаборанту Учебной лаборатории метеорологии географического факультета СГУ Нейштадт Якову Андреевичу за помощь в оформлении данного учебно-методического пособия.

Библиографический список

1. Иванов В. Э., Гусев А. В., Игнатков К. А., Кудинов С. И., Носков В. Я., Плохих О. В. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): материалы конференции. Севастополь: Вебер, 2012. С. 3–12.
2. Центральной аэрологической обсерватории 70 лет [Электронный ресурс]: [сайт]. URL http://www.cao-rhms.ru/cao_mini.pdf (дата обращения 18.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений [Электронный ресурс]: [сайт]. URL https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_ru.pdf (дата обращения 18.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Центральная аэрологическая обсерватория [Электронный ресурс]: [сайт]. URL <http://www.cao-rhms.ru/> (дата обращения 18.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. World Meteorological Organization, 1992: International Meteorological Vocabulary. Second edition, WMO-No. 182, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 2003a: Manual on the Global Observing System. Volume I, WMO-No. 544, Geneva.
7. Зайцева Н.А. Аэрология. – Л.: Гидрометеиздат. 1990. 325 с.
8. Червяков М. Ю., Шаркова С. А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 42–48.
9. Thorne P.W., Lanzante J.R., Peterson T.C., Seidel D. J. and Shine K. P. Tropospheric temperature trends: history of an ongoing controversy. // Climate Change, 2010, vol. 2, No. 1

10. Корнева И.А. Современные климатические изменения нижней тропосферы и деятельного слоя почвы в московском регионе // 2015. Диссертация на соискание степени кандидата географических наук.
11. University of Wyoming College of Engineering [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 10.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
12. Vaisala HUMICAP Technology [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <https://www.vaisala.com/en/vaisala-humicapr-technology> (дата обращения: 10.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
13. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). – СПб.: РГГМУ. 2003. 420 с.
14. АРВК «Вектор-М» [Электронный ресурс]: [сайт]. URL http://www.vektor.ru/produktsiya/grajdanskaya_produktsiya/vektor_meteo/meteorologicheskie_sistemyi/arvk_vektor_m (дата обращения 19.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
15. Основные принципы построения и алгоритмы работы аэрологического радиолактора МАРЛ-А [Электронный ресурс]: [сайт]. URL [http://cao-ntcr.mipt.ru/doc\(html\).htm](http://cao-ntcr.mipt.ru/doc(html).htm) (дата обращения 19.04.2019). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
16. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 4. Аэрологические наблюдения на станциях. Часть III. Температурно-ветровое радиозондирование атмосферы. (РД 52.11.650-2003) // 312 с.

Учебное издание

Червяков Максим Юрьевич

Зондирование атмосферы

Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся
по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Подписано в печать 21.05.2019.

Гарнитура Times. Печать Riso.

Усл. печ. л. 4,00. Тираж 300 экз. Заказ 0120.

Издательский центр «Наука»
410600, Саратов; Пугачёвская, 117, к.50

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ИП «Экспресс тиражирование»
410005, Саратов; Рахова 187/213, офис 220 ☎ 27-26-93



Доцент кафедры метеорологии и климатологии географического факультета Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Кандидат географических наук.

Руководитель Научного студенческого общества при кафедре метеорологии и климатологии, член Русского географического общества, European Geosciences Union и American Meteorological Society. Руководитель и исполнитель ряда научных грантов РГО, РФФИ и др.

Аэролог (специалист по радиозондированию атмосферы) аэрологической станции Саратовского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Приволжское УГМС» (г. Саратов, 2008 – 2018 гг.).

Выпускник международной научной школы «European Research Course on Atmospheres», (Университет Жозефа Фурье, г. Гренобль и Обсерватория Верхнего Прованса, Франция,



Кафедра метеорологии и климатологии
Адрес: г. Саратов, ул. Университетская, 59, кор. 4, ауд. 35
Телефон: +7 (8452) 51 - 54 - 28
Email: kafmeteo@mail.ru

