

ГЛАВА 12. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

12.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

12.1.1 Определения

Приведенные ниже определения, основанные на [Международном метеорологическом словаре](#) (ВМО-№ 182) и [Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО](#) (ВМО-№ 1160), относятся к аэрологическим измерениям с использованием радиозонда.

Радиозонд. Прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (таких как давление, температура, влажность), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

Радиозондовое наблюдение. Наблюдение с помощью радиозонда за метеорологическими параметрами в верхних слоях атмосферы, как правило, за атмосферным давлением, температурой, влажностью и за горизонтальной скоростью и направлением ветра.

Примечание: радиозонд может прикрепляться к газонаполненной оболочке (либо к другому медленно движущемуся беспилотному летательному аппарату), или конструкция может быть приспособлена к тому, чтобы сбрасываться (например, сбрасываемый зонд) с воздушного судна или ракеты.

Станция радиозондирования. Станция, на которой с помощью электронных средств проводятся наблюдения за атмосферным давлением, температурой, влажностью и, как правило, горизонтальным ветром на высотах.

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

Аэрологическая станция. Аэрологическая синоптическая станция, станция *температурно-ветрового радиозондирования*: 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.

В настоящей главе рассматриваются радиозондовые системы. Измерения, осуществляемые с использованием специальных платформ, специализированного оборудования и самолетов, или косвенным образом с применением средств дистанционного зондирования, таких как микроволновые радиометры и рамановские лидары для измерения содержания водяного пара в пограничном слое и тропосфере, рассматриваются в других главах [тома III](#) настоящего Руководства. Радиозондовые системы обычно используются для измерения давления, температуры и относительной влажности. В большинстве оперативных пунктов радиозондовые системы используются также для определения ветра на высотах (см. настоящий том, [глава 13](#)). Кроме того, на некоторых радиозондах установлены системы датчиков для определения таких характеристик атмосферы, как содержание озона или радиоактивность. В настоящей главе эти дополнительные измерения подробно не рассматриваются.

12.1.2 Единицы, используемые при аэрологических измерениях

Единицами измерения метеорологических параметров при радиозондовых наблюдениях являются гектопаскаль для давления, градус Цельсия или Кельвина 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 (гп. м), определяемый как 0,980 665 динамического метра. Отношение между геопотенциальной высотой и геометрической высотой представлено в 12.5.5.2. Различия в нижней тропосфере не столь велики, однако с увеличением высоты они увеличиваются.

При расчетах данных, полученных с помощью радиозондов, следует использовать значения физических функций и постоянных, принятые в [Техническом регламенте](#) (ВМО-№ 49), [том I](#), приложение А.

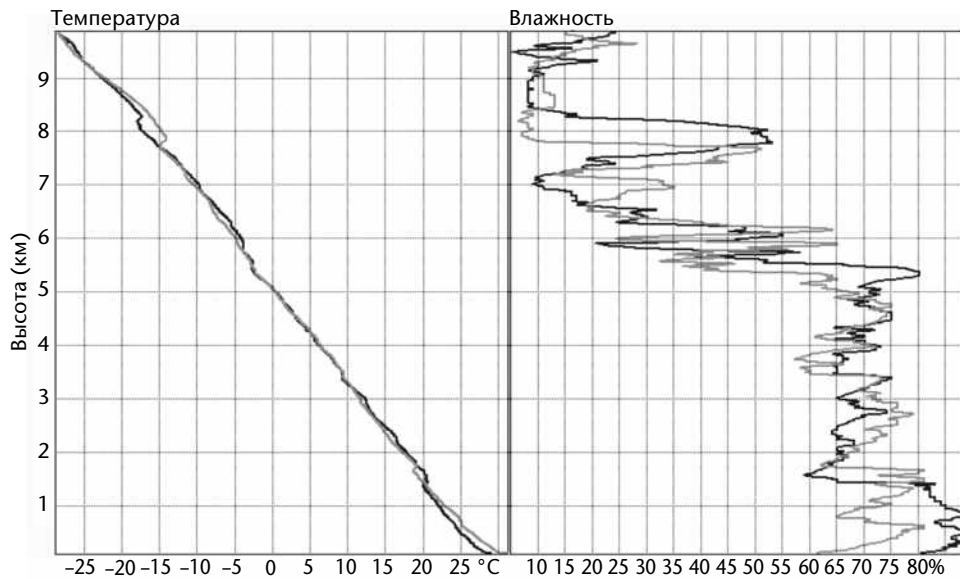
12.1.3 Метеорологические требования

12.1.3.1 Радиозондовые данные для метеорологического обеспечения

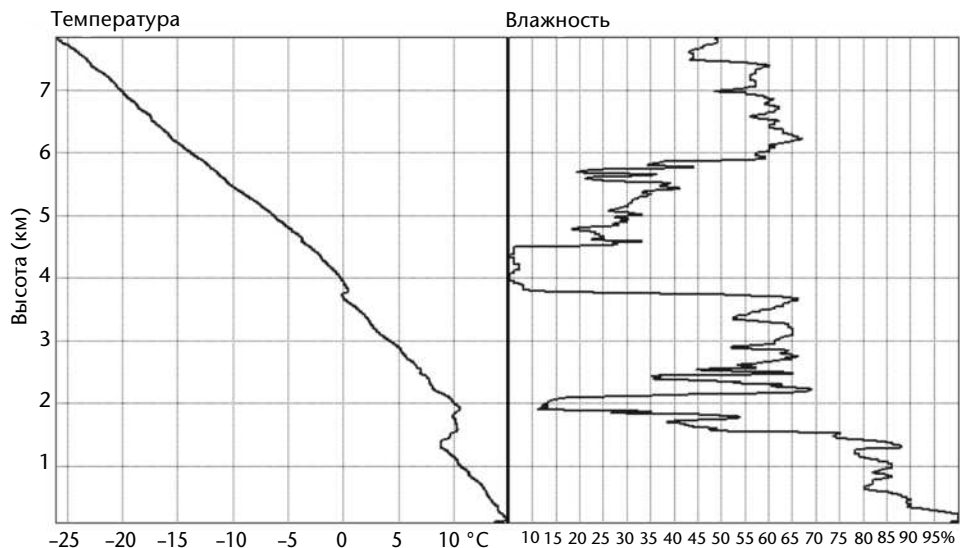
Аэрологические измерения температуры, ветра и относительной влажности — три вида основных измерений, данные которых используются при инициализации анализов моделей численных прогнозов погоды (ЧПП) для оперативного прогнозирования погоды. Радиозонды обеспечивают большую часть измерений температуры и относительной влажности *in situ* над сушей, в то время как радиозонды, запускаемые с отдаленных островов или морских судов, могут обеспечивать ограниченный, но важный охват такими данными над океанами. Измерения температуры с разрешением по вертикали, аналогичным разрешению при радиозондовых измерениях, могут проводиться с самолета либо во время набора высоты и снижения, либо при полете на крейсерских эшелонах. Самолетные наблюдения во время набора высоты и снижения используются для дополнения радиозондовых наблюдений над сушей и в некоторых случаях могут использоваться вместо радиозондов в отдельно взятой местности. Самолетные наблюдения позволяют производить измерения как над сушей, так и над океаном на крейсерских эшелонах. Наблюдения за распределением температуры и водяного пара в надире спутника имеют более низкое вертикальное разрешение, чем измерения с помощью радиозондов или воздушных судов. Спутниковые наблюдения особенно важны для полей анализа ЧПП над океанами и в других районах земного шара, где данных радиозондовых и самолетных наблюдений недостаточно или где они отсутствуют совсем.

Точные измерения вертикальной структуры полей температуры, ветра и водяного пара в тропосфере чрезвычайно важны для всех видов прогнозирования. Профили температуры атмосферы характеризуются резкими изменениями по вертикали, а изменения относительной влажности, связанные с резким изменением температуры, обычно бывают достаточно резко выраженными (см. рисунок 12.1). Измерения позволяют построить типичный вертикальный разрез слоев облаков или тумана. Такая вертикальная структура температуры и водяного пара обуславливает устойчивость атмосферы и, следовательно, количество и формы облаков, которые должны прогнозироваться. Радиозондовые измерения вертикальной структуры могут, как правило, производиться с точностью, достаточной для удовлетворения большинства потребностей пользователей.

Данные измерений вертикальной структуры полей температуры и относительной влажности с высоким разрешением имеют большое значение для исследований загрязнения окружающей среды (например, для определения толщины пограничного слоя атмосферы). Такое высокое разрешение при измерениях вертикальной структуры необходимо также для вычисления влияния рефракции атмосферы на распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) или звуковых волн. Разрешение по времени должно



а) пример профилей дневной температуры и влажности, полученных в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (22° с. ш.). Зондирование, представленное серым цветом, было осуществлено через 8 часов после зондирования, которое изображено черным цветом. Относительно небольшие сдвиги в скорости изменения температуры по вертикали были связаны с быстрым падением относительной влажности (в районе 0,7, 1,6, 3,5, 5,5 и 8 км).



б) пример температуры и относительной влажности летом в 0600 ВCB в Соединенном Королевстве (50° с. ш.), демонстрирующий неглубокий слой 100-процентной относительной влажности в тумане вблизи поверхности земли и очень резкое падение относительной влажности в слоях температурной инверсии между 1,5 и 2 км и на высоте 3,8 км.

Рисунок 12.1. Примеры профилей температуры и относительной влажности в нижней и средней тропосфере

быть как можно больше, например, 1 с, но не более 5 с. Помимо этого, для получения корректного описания атмосферы требуется информация о времени и положении радиозонда на каждом уровне.

Для гражданской авиации, артиллерии и других областей применения баллистики, таких как запуски космических аппаратов, предъявляются эксплуатационные требования к детализированным измерениям плотности воздуха при заданных значениях давления (рассчитанных на основе данных радиозондовых измерений температуры и относительной влажности).

Радиозондовые наблюдения также важны для исследований изменения климата в верхних слоях атмосферы. При этом необходимо надлежащим образом вести регистрацию систем, которые используются для измерений, включая информацию о версии программного обеспечения и корректировках и о расходных материалах, а также о методах наблюдений (например, длине подвески радиозонда), применяемых наряду с системами. Климатологи предпочли бы, чтобы необработанные данные архивировались дополнительно к обработанным данным и были доступны для последующих климатологических исследований. Исключительно важно регистрировать любые изменения в методах наблюдений, внедряемых с течением времени. В этом контексте оказалось необходимым установить изменения в приборах и практике радиозондирования, которые произошли с тех пор, как радиозонды стали использоваться на регулярной основе (см., например, Gaffen, 1993). 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 и сложны для того, чтобы произвести осмысленные корректировки на всех уровнях, которые требуются для исследований изменений климата. 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 низкокзатратными.

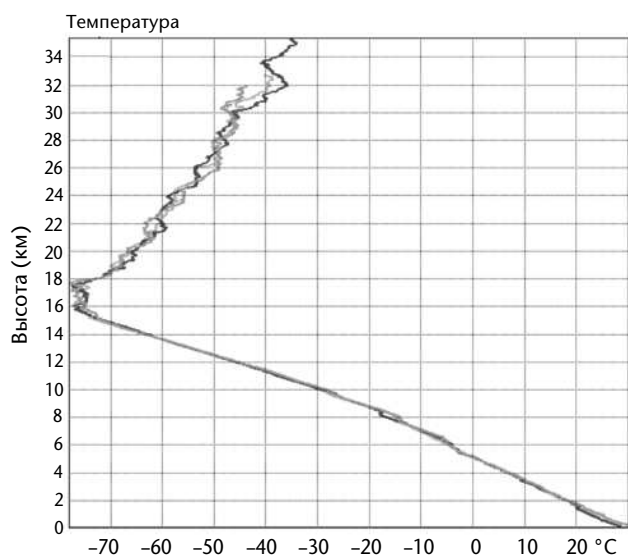
При внедрении новых конструкций радиозондов, чрезвычайно важно, чтобы было проведено достаточное тестирование характеристик нового радиозонда по сравнению со старым, чтобы временные ряды наблюдений на станции могли быть согласованы на основе данных сравнения. Такая гармонизация не должна приводить к ухудшению качества измерений, полученных с помощью усовершенствованного радиозонда, с тем чтобы обеспечить их сопоставимость с измерениями более низкого качества радиозондами более ранней конструкции. Следует также признать, что в некоторых случаях погрешности в более ранних измерениях были слишком велики для использования в климатологических исследованиях.

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 1 050 до 5 гПа
- температура от 50 °C до –95 °C
- относительная влажность от 100 % до 1 %
- 30 гПа на поверхности до 10^{-4} гПа для давления водного пара в тропопаузе для тропиков

Системы также должны быть способны поддерживать непрерывную и надежную работу при сильном дожде, в непосредственной близости от грозы и в тяжелых условиях обледенения.

Самые низкие температуры чаще всего встречаются вблизи тропической и субтропической тропопаузы, хотя зимой очень низкие температуры могут также наблюдаться на более высоких уровнях в стратосферном полярном вихре. На рисунке 12.2 показаны примеры профилей для субтропиков: к примеру, а) в Янцзяне, Китай (22° с. ш.) летом и б) на 50° с. ш. летом и зимой в Соединенном Королевстве. Более низкие температуры вблизи тропопаузы в тропиках представляют основную трудность для оперативных измерений с использованием датчиков относительной влажности, поскольку на сегодняшний день лишь немногие из них быстро реагируют на температуру ниже –70 °C (Nash, 2015). Таким образом радиозонды, которые успешно функционируют по всей тропопаузе на средних широтах, по-видимому, обеспечивают менее надежные измерения относительной влажности в верхней тропосфере в тропиках.



а) июль, Янцзян, Китай (3 подъема за 8 ч)

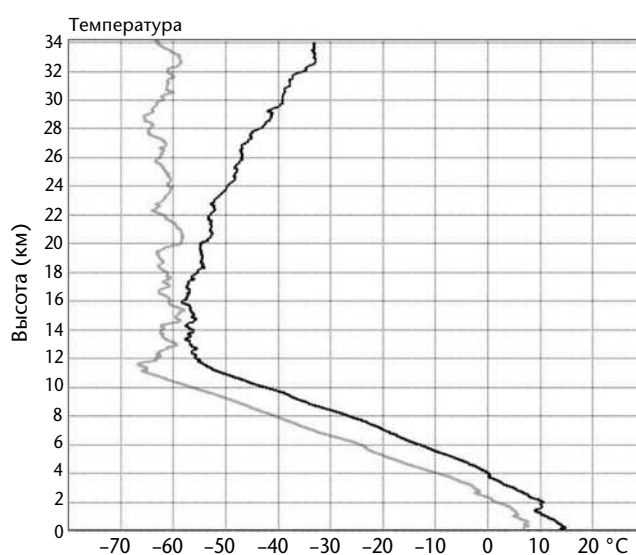
b) Соединенное Королевство, лето (черный профиль)
и зима (серый профиль)

Рисунок 12.2. Примеры отдельных полных профилей температуры, полученных при помощи шаров-зондов большого размера, пригодных для климатических наблюдений

Радиозондовое измерение напоминает моментальную выборку отдельного слоя атмосферы (радиозонд обычно поднимается на 300 м в минуту). Когда краткосрочные флуктуации температуры атмосферы от гравитационных волн и турбулентности невелики, радиозондовое измерение может отображать ситуацию над местностью достаточно эффективно на протяжении многих часов. С другой стороны, когда атмосфера очень изменчива (например, конвективный пограничный слой атмосферы), моментальная выборка может быть действительна не более минуты и может не соответствовать реальному среднему значению над местностью даже в течение часа. На рисунке 12.2 а) полученные радиозондом температуры в тропосфере были более воспроизводимы со временем, чем в стратосфере, вследствие существенного влияния гравитационных волн в стратосфере. Такие более существенные расхождения на высотах не были результатом неопределенности измерения прибора. Аналогично, колебания температуры по вертикали в стратосфере, приведенные на рисунке 12.2 b), не являются результатом неопределенности измерения прибора, поскольку во время испытательных полетов одна и та же структура была получена измерениями при помощи двух радиозондов различного типа.

12.1.3.2 ***Взаимосвязь между спутниковыми и радиозондовыми аэрологическими измерениями***

Недавний обзор спутниковых измерений и их использования в ЧПП был проведен Eyre et al. (2022). Наблюдения со спутниковых систем в надире (в самой нижней точке горизонта), не дают представления о вертикальной структуре с той же точностью или степенью доверия, как системы, установленные на радиозондах или воздушных судах. Современные спутниковые системы зондирования температуры и водяного пара обеспечивают наблюдение либо за восходящими потоками излучения в инфракрасной (ИК) области от эмиссии двуокиси углерода или водяного пара, либо, в качестве альтернативы, — эмиссии кислорода или водяного пара в микроволновом диапазоне (см. главу 3 тома IV настоящего Руководства). Зондирование как в инфракрасной области, так и в микроволновом диапазоне имеет исключительно важное значение для текущего оперативного ЧПП. Излучение, за которым ведется наблюдение со спутника, представляет собой интегрированное излучение в атмосфере на разных уровнях. Диапазон уровней определяется распределением излучающих газов по вертикали и поглощением со стороны атмосферы на частотах спутникового канала. Данные о большинстве излучений, полученные по одному спутниковому каналу измерения температуры, приблизительно соответствуют средней температуре слоя, толщина которого составляет, по меньшей мере, 10 км. Однако более высокое вертикальное разрешение достигается с помощью интерферометров с преобразованием Фурье, работающих в ИК-диапазоне и использующих информацию от гораздо большего числа каналов с несколько отличающимися характеристиками поглощения. Распределение по высоте (весовая функция) наблюдаемого излучения в канале для измерения температуры изменяется в определенной степени в зависимости от географического местоположения. Это происходит потому, что способность атмосферы переносить излучение незначительно зависит от температуры. Концентрация излучающих газов может слегка колебаться в зависимости от географического местоположения и наличия облачности; на радиационный теплообмен могут также оказывать влияние аэрозоли и вулканическая пыль. ИК- и микроволновое зондирование затруднительно использовать в нижних слоях тропосферы, над снежной или ледяной поверхностью. Таким образом, основные спутниковые наблюдения за температурой путем зондирования обеспечивают хорошее горизонтальное разрешение и пространственный охват по всему земному шару для сравнительно толстых слоев по вертикали, однако точное распределение наблюдаемого атмосферного излучения по вертикали в какой-либо заданной точке определить труднее.

Большая часть данных об излучении, получаемых при наблюдениях в надире по спутниковым каналам для измерения содержания водяного пара в тропосфере, относится к слоям атмосферы толщиной примерно от 4 до 5 км. Давление в атмосферных слоях, за излучением которых наблюдают при помощи канала для измерения водяного пара, колеблется в зависимости от географического местоположения в гораздо большей степени, чем в случае каналов для измерения температуры. Это связано с тем, что толщина слоя и давление в середине слоя, за которым ведется наблюдение, в значительной степени зависят от распределения водяного пара по вертикали. Например, слои, за которыми ведется наблюдение с помощью определенного канала для измерения водяного пара, будут располагаться ближе к земной поверхности в случае, когда верхняя тропосфера очень сухая. Показатели излучения, за которыми ведется наблюдение при помощи канала для измерения водяного пара, зависят от температуры водяного пара. Поэтому рассчитать распределение водяного пара по вертикали можно лишь в том случае, если имеются приемлемые данные о вертикальной структуре поля температуры.

Спутниковые системы лимбовых наблюдений могут обеспечивать измерения структуры атмосферы с более высоким вертикальным разрешением, чем спутниковые системы надирных наблюдений; примером системы такого типа являются измерения рефракции, полученные для случаев радиозатмения Глобальной системы определения местоположения (ГСОМ). Это обеспечивает получение информации о температурах на верхних уровнях и некоторой информации о влажности на низких уровнях. По этой методике вертикальная структура измеряется вдоль горизонтали по крайней мере на удаленность 200 км (Ruston et al., 2022). Эта методика широко используется в настоящее

время, поскольку позволяет проводить более совершенные измерения вертикальной структуры температуры, особенно в стратосфере. В отличие от зондирований в надире, измерения радиозатмения не требуют коррекции систематической погрешности.

Коррекция систематической погрешности измерения является важным аспектом использования информации спутникового зондирования в системах ЧПП. Как отметил Eyre (2016), влияние смещения модели на фоновые и аналитические погрешности будет увеличиваться по мере того, как все больше наблюдений корректируются на систематическую погрешность, а меньшая часть используется в качестве «якорных» наблюдений. Что касается температуры атмосферы, основными «якорными» наблюдениями являются радиозатмения и радиозондовые наблюдения. В настоящее время данные наблюдений за температурой с борта воздушного судна нуждаются в коррекции погрешности, но, возможно, удастся усовершенствовать бортовую обработку так, чтобы в этом не было необходимости. Традиционно спутниковая калибровка/валидация включала совмещенные наблюдения с помощью радиозондов, но в этом процессе можно было использовать лишь небольшую часть точек спутниковых данных. Существует тенденция к использованию полей ЧПП для спутниковой калибровки/валидации (с включением всех точек спутниковых данных) и использованию других наблюдений, включая радиозонды, для калибровки полей ЧПП (Newman et al., 2020).

Следовательно, радиозондовые и спутниковые системы зондирования, наряду с воздушными судами, являются взаимодополняющими системами наблюдения и обеспечивают при совместном использовании наиболее надежную глобальную систему наблюдения. Наблюдения при помощи радиозондов и с воздушных судов улучшают ЧПП даже в условиях, когда доступны гораздо большие объемы данных спутниковых измерений.

12.1.3.3 **Максимальная высота радиозондовых наблюдений**

Наблюдения при помощи радиозондов проводятся на регулярной основе для измерений вплоть до высоты около 35 км (см. пример на рисунке 12.2). 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. Погрешности измерения температуры имеют тенденцию к увеличению с высотой, но современные радиозонды способны проводить измерения, дающие полезные результаты, до высоты 35 км, особенно ночью. Использование больших шаров-зондов на некоторых станциях в определенные сроки будет необходимо для выполнения потребностей Глобальной опорной сети наблюдений (ГОСН) (*Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160)).

Проблемы, связанные с искажением показаний датчиков во время полета и очень большими величинами постоянных времени (инерции) датчиков при низкой температуре и низком давлении, на сегодняшний день ограничивают практическую пригодность качественных радиозондовых измерений относительной влажности в стратосфере.

Существуют различные факторы, которые могут ограничить полезность качественных измерений относительной влажности с помощью радиозондов в стратосфере. В некоторых случаях проблемы, связанные с загрязнением датчиков влагой во время подъема, могут вызвать отклонение и дополнительные шумы в результатах измерений относительной влажности. В целом, очень большие постоянные времени реакции датчика при низких температурах могут ограничивать точность, особенно во время фазы быстрого снижения влажности, обычно наблюдаемой выше тропопаузы. На больших высотах в стратосфере базовая точность измерений может оказаться ограниченной. Поскольку уровни относительной влажности обычно постепенно снижаются до уровня ниже 1 % относительной влажности, в какой-то момент измеряемый уровень относительной влажности достигает неопределенности измерения датчика.

12.1.4 Требования к неопределенности измерений

В настоящем разделе в обобщенном виде представлены требования к погрешностям (которые обычно записываются в терминах $k = 2$, что предполагает уровень достоверности 95 %; см. настоящий том, [глава 1](#)) измерений метеорологических параметров, измеряемых с помощью радиозондов, и проводится их сравнение с типичными характеристиками эксплуатируемых радиозондов. Более подробное рассмотрение точности и источников ошибок содержится в нижеприведенных разделах, посвященных отдельным метеорологическим параметрам (см. [12.3.7](#), [12.4.6](#), [12.5.4](#) и [12.5.6](#) по температуре, относительной влажности, давлению и высоте соответственно). Определение неопределенности, систематической погрешности, отклонения и другие определения содержатся в настоящем томе, [глава 1](#).

Оценки достижимой оптимальной неопределенности для радиозондовых наблюдений по состоянию на 2012 г. представлены в [приложении 12.A](#). Это приложение было подготовлено после проведения взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011). В нем описывается оптимальная точность, которая может на сегодняшний день быть достигнута в оперативных радиозондах.

Обобщенные требования к предельным значениям неопределенности и вертикального разрешения радиозондовых наблюдений из документов ВМО, приведены в [приложении 12.B](#). В приведенные таблицы включена информация из базы данных, содержащей требования к наблюдениям ВМО (ОСКАР/Потребности; см. <https://space.oscar.wmo.int/observingrequirements>), нормативные требования к наблюдениям, опубликованные ВМО (WMO, 2009) для Опорной аэрологической сети (ГРУАН) Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК), и некоторая информация по данным исследований изменчивости атмосферы, доступная в *Performance Requirements of Aerological Instruments* (WMO-No. 267). В работе Dirksen et al. (2014) приводится подробное описание неопределенностей, связанных с первым продуктом данных ГРУАН.

База данных с требованиями к наблюдениям ВМО содержит три максимально допустимых значения точности измерений для большинства метеорологических параметров:

- a) целевое значение: требование оптимальной точности;
- b) пороговое значение: минимальная точность, которая должна быть обеспечена для того, чтобы данные были полезными;
- c) перспективное значение: промежуточный уровень между пороговым и целевым значением, достижение которого приведет к значительному улучшению в целевом применении.

Таблицы 12.B.1, 12.B.2 и 12.B.3 в [приложении 12.B](#) основаны, главным образом, на требованиях прикладной области ЧПП с высоким разрешением, тем не менее информация о целевых значениях точности измерений, полученных из работ по атмосферной изменчивости, также представлена в тех случаях, когда целевые значения отличаются от установленных в базе данных с требованиями к наблюдениям ВМО. Требования, связанные с изучением климата, основаны на требованиях ГРУАН и тех требованиях, которые изложены в разделе, описывающем базу данных с требованиями к наблюдениям для деятельности Группы экспертов ГСНК по атмосферным наблюдениям в интересах изучения климата или по стратосферным процессам и их роли в климате. В этом случае также, когда имеются существенные различия в целевых значениях точности измерений между двумя базами данных, они указываются в таблицах. Требования к точности определения геопотенциальной высоты в таблице 12.B.4 были установлены, как это описано в [приложении 12.B](#).

Радиозонд, отвечающий менее строгим требованиям перспективной точности измерений, изложенным в [приложении 12.A](#), должен обеспечивать измерения, которые позволяют получить хорошее соотношение затрат и результатов с точки зрения национального

целенаправленного использования. Однако менее строгие требования к точности измерений не будут удовлетворять ожидания некоторых пользователей, например, в том, что касается первичных площадок, используемых для обнаружения изменений климата. Таким образом, для оперативной работы должно быть принято решение относительно качества наблюдений, которое требуется для национальной сети, учитывая, что использование таких данных в прогнозах улучшит качество прогнозов по всей стране, при условии, если наблюдение удовлетворяет требуемым значениям перспективной точности измерений.

Требования в отношении расстояния между точками наблюдений в горизонтальном направлении из базы данных (<https://space.oscar.wmo.int/observingrequirements>), содержащей требования к наблюдениям ВМО, в данной главе не приводятся, но вместе с тем из них очевидно следует, что одни только радиозондовые наблюдения не могут удовлетворить минимальные требования Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (ИГСНВ) и они должны быть дополнены измерениями температуры, относительной влажности и ветра при помощи других систем наблюдений.

12.1.4.1 **Геопотенциальная высота: требования и точность измерения**

Современные системы радиозондирования могут иметь систематическую погрешность по давлению немногим больше 1 гПа вблизи поверхности земли, однако столь большие систематические погрешности при давлении ниже 100 гПа сегодня являются редкостью (см. таблицу 12.10). Радиозонды, по-прежнему использующие самые лучшие датчики давления, могут проводить измерения высоты около 10 гПа с неопределенностью ($k = 2$) от 300 м до 400 м, то есть с неопределенностью измерения давления около 0,6 гПа.

Таким образом, целевая неопределенность измерения высоты для ЧПП может быть обеспечена большинством радиозондов, использующих датчик давления до 100 гПа. При этом однако требуется, чтобы радиозонд измерял высоту при помощи технологии ГСОН с тем, чтобы обеспечить измерения до высоты 30 км с неопределенностью измерения не более 20 м, что эквивалентно неопределенности измерения давления в 0,05 гПа и менее в зависимости от точности радиозондовых измерений температуры.

Концентрации озона в стратосфере характеризуются четко выраженными градиентами по вертикали, и погрешности определения высоты, вытекающие из даже относительно небольших погрешностей датчиков давления, могут вносить значительные неточности в сообщения, поступающие с озонных зондов на всех широтах. Это оказалось одним из лимитирующих факторов данного типа измерений при использовании радиозондов прежнего типа с более значительными неопределенностями измерения давления в стратосфере.

12.1.4.2 **Температура: требования и точность измерений**

Большинство современных радиозондовых систем (введенные в эксплуатацию, начиная с 2000 г.) позволяют измерять температуру в тропосфере и стратосфере до высоты приблизительно 31 км с неопределенностью ($k = 2$) в пределах от 0,4 до 1 К. Такая точность, как правило, близка к оптимальной точности для целей ЧПП, предложенной в таблице 12.В.2 [приложении 12.В](#). Однако в некоторых национальных сетях станций радиозондирования в тропических регионах все еще можно обнаружить неопределенности, значительно превышающие 2 К. Если данные измерений с такими большими погрешностями используются, то они наносят вред ЧПП.

В стратосфере неопределенности радиозондовых измерений температуры могут быть близки к целевым значениям для ЧПП, но требуется некоторое улучшение точности для дневных условий с целью оптимизации для удовлетворения потребностей климатических исследований.

Поскольку целевая точность измерений для определения температуры в целях изучения климата более жесткая, чем для ЧПП, ведущий центр ГРУАН продолжает работать с изготовителями и операторами над уменьшением неопределенности проводимых оперативных измерений в тропосфере и стратосфере. При этом исключительно важно, чтобы систематическое отклонение было как можно более постоянным со временем, а это требует более жестких предельных значений для методов наблюдений, чем те, которые используются на стандартных оперативных площадках. Для того, чтобы добиться наиболее полезной точности измерений, операторы должны следить за тем, чтобы подготовка и функционирование радиозондов соответствовали предписаниям, будь то инструкции из настоящего Руководства, инструкции изготовителя или действующие на станциях ГРУАН, и выполнялись процедуры, согласованные с ведущим центром ГРУАН. В случае ГРУАН детали подготовки радиозондов должны записываться и архивироваться как часть метаданных, связанных с измерениями (Dirksen et al., 2014; von Rohden et al., 2022).

12.1.4.3 **Относительная влажность: требования и точность измерений**

Неопределенность современных измерений относительной влажности при температурах выше 50 °C лежит в основном в диапазоне от 5 % до 14 % относительной влажности. Таким образом, измерения в большинстве случаев соответствуют требованиям к перспективным значениям точности измерений для целей ЧПП, однако во многих случаях требуется улучшение для достижения перспективных значений точности измерений для климатических измерений (см. [приложении 12.B](#), таблица 12.B.3).

При температурах ниже –50 °C неопределенность измерений увеличивается, при этом самые лучшие датчики оперативных радиозондов дают неопределенность около 16 % относительной влажности при –70 °C, что близко к перспективному значению для ЧПП, но не отвечает требованиям для климатических измерений. Однако большинство современных датчиков обеспечивают неопределенность около 24 % относительной влажности при самых низких температурах. В ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011) был выявлен ряд проблем. Ожидается, что неопределенность измерений относительной влажности в верхней тропосфере со временем будет снижаться по мере того, как будут устраняться упомянутые проблемы.

12.1.5 **Методы измерения**

В настоящем разделе приводятся общие сведения о методах радиозондовых измерений. Подробно работа приборов и процедуры приводятся в других разделах.

12.1.5.1 **Ограничивающие факторы при проектировании радиозондов**

При проектировании радиозондов необходимо находить определенные компромиссные решения:

- a) При измерениях температуры наиболее надежные результаты получают, когда датчики размещены над верхней поверхностью радиозонда, и при этом не защищены; однако при таком размещении датчики подвергаются воздействию прямого солнечного излучения. В большинстве современных радиозондов применяется покрытие, позволяющее уменьшить нагревание датчиков температуры солнцем и обмен тепла в инфракрасной области. Поправки на радиацию бывают наиболее корректными в том случае, когда датчик температуры и его держатели спроектированы таким образом, что нагревание солнцем не сильно разнится по мере вращения радиозонда относительно солнца. В программном обеспечении для обработки данных предусмотрены поправки на остаточный разогрев солнцем.

- b) С целью защиты от дождя для некоторых датчиков относительной влажности используют защитный экран или шахту, но это снижает вентиляцию датчика и соответственно скорость реагирования всей системы датчиков. Кроме того, защита или шахта становятся источником искажения показаний датчика после прохождения зонда через облака. Одним из альтернативных решений является наличие двух датчиков, которые чередуются: один обогревается для удаления загрязнения, в то время как другой передает данные об относительной влажности, затем второй датчик обогревается, а первый передает информацию об относительной влажности и так далее. Лучшие результаты теперь достигаются при наличии одного датчика влажности с умеренным нагревом (около 5 К выше температуры окружающей среды) в сочетании с прямым измерением температуры датчика влажности.
- c) Датчики давления обычно устанавливаются внутри зонда, чтобы свести к минимуму изменения температуры в датчике во время полета и обеспечить оптимальное размещение датчиков температуры и относительной влажности.
- d) Во многих современных радиозондах датчик давления не используется и геометрическая высота определяется при помощи технологии ГСОМ, а затем переводится в геопотенциальную высоту на основе данных о гравитационных полях в данном месте.

К другим важным факторам, которые необходимо учитывать при проектировании радиозондов, можно отнести их надежность, прочность, а также легкий вес и небольшие размеры, способствующие более успешному запуску. Учитывая доступность современных электронных средств мультимплексирования, важно также обеспечить, чтобы датчики радиозонда 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 используются только один раз или не более чем несколько раз, они должны быть достаточно дешевыми при массовом производстве. Простота и стабильность калибровки являются очень важным показателем, поскольку радиозонды приходится часто хранить в течение продолжительных периодов времени (более года), прежде чем они будут использованы. Некоторые из наиболее важных станций ГСНК, к примеру в Антарктике, размещены в таких местах, куда радиозонды могут доставляться только раз в год.

Радиозонд должен передавать устойчивый сигнал на наземный приемник при наклонной дальности по меньшей мере 200 км. Напряжение батареи радиозонда меняется как с ходом времени, так и при изменении температуры. Поэтому радиозонд должен быть сконструирован таким образом, чтобы изменение напряжения батареи не приводило к уменьшению точности измерений или к неприемлемому смещению частоты радиопередачи.

12.1.5.2 **Радиочастоты, используемые для передач с радиозондов**

Полосы радиочастот, используемых в настоящее время для большинства передач с радиозондов, приведены в таблице 12.1. Эти полосы соответствуют распределению частот для метеорологических нужд, зафиксированному в Регламенте радиосвязи Международного союза электросвязи.

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, а высота полета шара часто очень низкая. 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 1680 МГц. Там, где ветры на высотах не столь сильны, выбор частоты в среднем определяется выбором метода, который используется для измерения ветра на высотах (см. настоящий том, [глава 13](#)). Так, при выборе для измерения ветра навигационной системы

Таблица 12.1. Основные частоты, используемые радиозондами в полосах радиочастот, выделенных для метеорологических целей

<i>Радиочастотный диапазон (МГц)</i>	<i>Статус</i>	<i>Регионы МСЭ</i>
400,15–406	Основной	Все
1668,4–1700	Основной	Все

Примечание: некоторые вторичные радиолокационные системы, производимые и эксплуатируемые в Российской Федерации, действуют в диапазоне радиочастот с центром на 1780 МГц.

используется обычно частота 400 МГц, а частота 1 680 МГц должна выбираться для измерения ветра радиотеодолитами или антеннами слежения, используемыми с радиозондовыми системами.

Радиочастоты, указанные в таблице 12.1, выделяются на основе разделения частот с другими службами. В некоторых странах национальные органы, ответственные за радиосвязь, выделяют часть полос радиочастот другим пользователям, и поэтому вся полоса полностью не может использоваться для передач с радиозондов. В других странах, в которых большое число радиозондовых систем образует плотную сеть, разработаны строгие спецификации в отношении смещения радиочастот и ширины полос, на которых должны работать отдельные радиозонды.

Любая организация, планирующая запуск радиозондов, должна удостовериться в том, что для их эксплуатации можно воспользоваться подходящими радиочастотами, а также в том, что они не помешают работе радиозондов НМГС.

В настоящее время существуют требования со стороны правительственных учреждений повышать эффективность использования радиочастот. Следовательно, в будущем при эксплуатации радиозондов необходимо будет делить радиочастоты с большим числом пользователей. Вероятно, что во многих странах станет практически невозможным использование широкополосных радиозондовых систем, занимающих большую часть имеющегося спектра полос радиочастот, выделенных для метеорологических нужд. В связи с этим планирование будущих работ в большинстве стран должно быть основано на принципе, согласно которому, во избежание ненужных помех радиозондовые передатчики и приемники должны работать в полосах, ширина которых гораздо меньше 1 МГц. Устойчивость передатчика должна быть лучше ± 5 кГц в странах с плотной сетью радиозондов и не хуже примерно ± 200 кГц в большинстве остальных стран.

НМГС необходимо поддерживать контакт с национальными органами по радиосвязи для того, чтобы сохранять выделенные им надлежащие радиочастоты и обеспечивать своим оперативным действиям защиту от помех. При эксплуатации радиозондов необходимо также не создавать помех и избегать помех со стороны платформ сбора данных, передающих информацию на метеорологические спутники в диапазоне частот 401—403 МГц, с линий связи, идущих вниз с метеорологических спутников в диапазоне 1690—1700 МГц, и от сигналов для передачи команд и сбора данных для метеорологических спутников в ограниченном ряде географических пунктов в диапазоне 1670—1690 МГц.

12.1.6 Погрешности радиозондовых измерений: общие сведения

12.1.6.1 Типы погрешностей

В настоящем разделе подробно рассматривается вопрос о погрешностях в показаниях радиозондовых датчиков.

Погрешности радиозондовых измерений могут быть классифицированы по трем типам (Ноорер, 1975):

- a) систематические погрешности, характерные для определенного типа радиозондов в целом;
- b) погрешность радиозонда, представляющая собой вариации погрешностей, которые характерны для конкретного типа радиозонда и повторяются из полета в полет при вертикальном подъеме в атмосфере;
- c) случайные погрешности (теперь называемые неопределенностями) отдельных наблюдений, приводящие к разбросу значений, накладываемых на погрешность радиозонда при заданном подъеме в атмосфере.

Вместе с тем, многим пользователям целесообразно принимать во внимание величину ошибки репрезентативности, которая связана с измерением (см. Kitchen (1989) и настоящий том, [глава 1](#)). Например, радиозондовые наблюдения за температурой имеют неопределенность в схемах усвоения данных, и это в большей степени связано с ошибкой репрезентативности, чем с небольшими неопределенностями приборов, обозначенными в [12.3.7](#). Эти ошибки могут быть различными в зависимости от атмосферной ситуации, а также от того, каким образом используются результаты измерений. Например, с увеличением масштабов движения, представленных в модели ЧПП, ошибки репрезентативности радиозондов должны уменьшаться, поскольку модель отражает большую часть параметров, которые измеряет радиозонд. С другой стороны, климатолог хочет иметь результаты измерений, которые близки к более долгосрочному среднему значению, являющемуся репрезентативным для значительной области вокруг места запуска. Структура, вызываемая локализованными мелкомасштабными флуктуациями в радиозондовых измерениях, для этих целей нежелательна.

12.1.6.2 Потенциальные стандартные значения

Высокоточные измерения радиолокаторов сопровождения или измерения высоты с помощью Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) позволяют выразить количественно систематические погрешности измерений геопотенциальной высоты. Полученные таким образом результаты можно затем использовать для определения систематических погрешностей измерений с помощью радиозондового датчика давления, если известно, что неопределенности измерений температуры сравнительно невелики.

Большинство современных радиозондов измеряют температуру в ночное время с точностью $\pm 0,2$ К на высоте 30 км (Nash et al., 2006, 2011). Таким образом, в ночное время можно определить систематические погрешности, которые вызывают отклонение результатов радиозондовых измерений от фактических значений.

Однако по-прежнему не представляется возможным интерпретация сравнений данных о температуре в дневное время с той же степенью достоверности. Например, средние неопределенности измерений температуры в одних и тех же сравнениях расходятся в пределах $\pm 0,5$ К на высоте 30 км. В работе Dirksen et al. (2014) ясно показаны неопределенности измерений, связанных с солнечной радиацией на верхних уровнях. Одна из проблем заключается в том, что поправки на радиацию предполагают средние условия облачности: больше/меньше отраженного солнечного излучения,

чем в среднем, сделают внесенную поправку неоптимальной. Погрешность измерения излучения также зависит от ориентации датчика, которая меняется при раскачивании и вращении радиозонда.

Данные измерений относительной влажности могут быть проверены при высоких значениях влажности, когда радиозонды проходят через облака. В этом случае лазерный облакомер и радиолокаторы для определения характеристик облаков могут дать более качественные данные об облаке, за которым наблюдал радиозонд во время своего подъема. Вертикальный профиль относительной влажности, полученный с помощью радиозондов, включая наличие очень сухих слоев, можно проверить путем сравнения с данными измерений, проводимых с помощью рамановского лидара. Что касается станций ГРУАН, в работе Dirksen et al. (2014) рекомендуется использовать стандартную камеру влажности (при относительной влажности 100 %) в качестве проверки перед запуском (это лучше, чем использование осушителя для обеспечения относительной влажности ~0 %).

В ходе большинства сравнений радиозондов результаты, полученные с радиозондов одной конструкции, сравниваются с результатами, полученными с радиозондов другой конструкции, с тем чтобы получить оценку их систематических расхождений. Наиболее масштабными сериями сравнений радиозондов после 1984 г. были международные взаимосравнения радиозондов BMO (Nash and Schmidlin, 1987; Ivanov et al., 1991; Yagi et al., 1996; Balagurov et al., 2006) и сравнения, проведенные в Бразилии (da Silveira et al., 2006), Маврикии (Nash et al., 2006) и Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011). В соответствующих разделах ниже приводятся результаты, полученные в ходе этих и других сравнений с одними и теми же эталонными приборами в Соединенном Королевстве (см. результаты, полученные Метеорологическим бюро в Камборне (Smees et al., 2010), в США и Швейцарии.

Существует несколько национальных структур, в которых можно проверить точность и надежность радиозондовых датчиков при различных давлениях и температурах в лабораторных условиях. Взаимное сравнение радиозондовых датчиков влажности (Balagurov et al., 2006) позволило получить результаты лабораторных сравнений со стандартами влажности в Российской Федерации. Эти результаты могут помочь выявить некоторые, но далеко не все, проблемы, установленные во время полетов радиозондов в атмосфере.

12.1.6.3 ***Источники дополнительных ошибок во время функционирования радиозондов***

Современные радиозонды имеют сокращенные или автоматизированные предполетные проверки. Там, где они все еще выполняются вручную, чрезвычайно важно перед запуском радиозонда проводить его тщательную проверку, поскольку ошибки в измерении значений контрольных данных, используемых для коррекции калибровки, могут привести к появлению значительных погрешностей измерений во время полета радиозонда. Следует также избегать ошибок в данных приземных наблюдений, полученных в стандартной метеорологической будке, и дальнейшего их попадания в результаты измерений. Ошибка в данных о приземном давлении повлияет впоследствии на все расчетные значения геопотенциальной высоты. По этой же причине важно, чтобы данные наблюдений за приземным давлением были приведены к уровню высоты станции.

Неопределенности измерений в современных радиозондовых измерениях, как правило, невелики. Это результат применения в радиозондах усовершенствованной электроники и мультиплексирования, обеспечивающих более надежную связь с наземной станцией для передачи информации и повышения эффективности автоматизированной обработки данных на наземной станции. Соответственно неопределенности измерений обычно менее значительны, чем систематические погрешности радиозонда и происходящие от полета к полету изменения в точности измерений и калибровке датчиков (погрешность радиозонда). Однако неопределенности измерений могут стать значительными, когда происходит частичный отказ в работе радиозонда, когда возникают помехи от другого

радиозонда, передатчик которого работает на той же частоте, либо когда радиозонд находится на большом наклонном расстоянии и малой высоте, которые несовместимы с характеристиками приемников и антенн наземной системы.

Таким образом, погрешности радиозондовых измерений могут возникать не только из-за конструкции датчиков радиозонда и проблем с калибровкой на заводе во время их изготовления, но также и из-за проблем приема сигналов с радиозондов на земле, которые отражаются на последующей обработке данных. При плохом приеме сигнала программное обеспечение для обработки данных часто определяет значения просто путем интерполяции случайных измерений, которые считаются допустимыми. В этом случае очень важно, чтобы оператор был осведомлен о количестве интерполированных данных. Качество данных может быть настолько плохим, что следует прекратить наблюдение за радиозондом и запустить вместо него другой радиозонд.

12.2 РАДИОЗОНДОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

12.2.1 Общие характеристики

Базовая конструкция радиозонда состоит, как правило, из трех основных элементов:

- a) датчики плюс образцовый прибор;
- b) электронный преобразователь, преобразующий выходные сигналы с датчиков и образцовых приборов в электрические сигналы;
- c) радиопередатчик.

В системах радиоветровых зондов (см. настоящий том, [глава 13](#)) имеются также электронные средства, необходимые для приема и передачи радионавигационных сигналов, или электронные средства системы приема-передатчика для использования со вторичными радиолокаторами.

Радиозонды, как правило, должны обеспечивать измерение более одного метеорологического параметра. 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.

12.2.2 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 5 гПа емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для снабжения требуемыми токами в течение до трех часов, с учетом того, что запуск радиозонда часто может 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 использовались батареи двух типов: батареи с сухими элементами и водоналивные батареи. Применение сухих батарей быстро росло благодаря их преимуществу, заключающемуся в том, что они

легкодоступны по очень низкой цене, поскольку в большом количестве производятся по всему миру и предоставляют меньшую опасность с точки зрения охраны здоровья и техники безопасности (и воздействия на окружающую среду). Использование батарей, активируемых водой, похоже, прекратилось.

Необходимо позаботиться о том, чтобы батареи не представляли опасность для окружающей среды после того, как радиозонд упадет на землю в результате разрыва оболочки воздушного шара. См. более детальное рассмотрение вопросов охраны окружающей среды в [12.7.5](#) и [приложении 12.C](#).

12.2.3 Методы передачи данных

12.2.3.1 Радиопередатчик

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 договорились о стандартных методах и формате передачи данных с радиозондов на наземную станцию, что обеспечило бы для пользователей функциональную совместимость между различными типами радиозондов без необходимости модифицировать каждый раз аппаратное и программное обеспечение наземного приема. В любом случае органы, регулирующие правила радиосвязи, во многих регионах мира будут требовать в будущем соответствия передатчиков радиозондов определенным спецификациям, чтобы минимизировать занятый радиочастотный спектр и дать возможность другим пользователям использовать выделенные для метеорологических нужд полосы радиочастот (см. [12.1.5.2](#)).

12.3 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

12.3.1 Основные требования

Лучшие современные датчики температуры должны обладать такой инерцией на изменения температуры, при которой систематическая погрешность от тепловой инерции в ходе подъема радиозонда, обычная скорость подъема $5\text{—}6\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, составляла бы менее 0,1 К при прохождении через любой слой толщиной 1 км в тропосфере и менее 0,2 К при прохождении через любой слой толщиной 1 км. 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. Необходимо обеспечить по возможности наименьшее изменение площади сечения, которая подвергается нагреванию солнцем, когда датчик вращается относительно солнца во время подъема. Теплообмен, связанный с ИК-излучением, необходимо исключить путем использования покрытий для датчиков с низкой излучающей способностью в ИК-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 качестве основных типов датчиков температуры, используемых на регулярной основе, можно назвать резистивные датчики (например, термисторы, изготовленные из керамических резистивных полупроводников), емкостные датчики и термопары.

Скорость реакции датчика обычно измеряется величиной постоянной времени τ . Она определяется (как и в настоящем томе I, глава 1, 1.6.3) по формуле:

$$dT_e/dt = -1/\tau \cdot (T_e - T) \quad (12.1)$$

где T_e — температура датчика и T — действительная температура воздуха.

Таким образом, постоянная времени определяется как время, необходимое для реагирования на какое-либо внезапное изменение температуры на величину 63 %. Постоянная времени датчика температуры прямо пропорциональна теплоемкости и обратно пропорциональна скорости передачи тепла путем конвекции/диффузии от этого датчика. Теплоемкость зависит от объема и материала датчика, в то время как передача тепла от датчика зависит от площади его поверхности и коэффициента теплопередачи, а также от скорости воздушного потока над датчиком. Коэффициент теплопередачи незначительно зависит от диаметра датчика. Таким образом, величина постоянной времени датчиков температуры, изготовленных из какого-либо заданного материала, приблизительно пропорциональны отношению объема датчика к площади его поверхности. Следовательно, наиболее эффективными для достижения быстрой реакции являются тонкие датчики с большой площадью поверхности. Изменение постоянной времени ответной реакции в зависимости от скорости воздушного потока может быть выражено следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \cdot (\rho \cdot v)^{-n} \quad (12.2)$$

где ρ — плотность воздуха, v — скорость воздушного потока над датчиком и n — константа.

Значение n изменяется от 0,4 до 0,8 в зависимости от формы датчика и от характера воздушного потока (ламинарный или турбулентный). Некоторые величины постоянной времени как устаревших, так и современных типов датчиков температуры при показателях давления 1 000, 100 и 10 гПа и скорости подъема 5 м с⁻¹ представлены в таблице 12.2. Эти значения получены путем объединения результатов лабораторных проверок и результатов сравнений с малоинерционными датчиками при подъеме в ходе испытательных сравнений радиозондов.

Современные термисторы-бусинки, проволочные конденсаторы и термопары имеют малую инерционность, поэтому систематические погрешности, обусловленные тепловой инерцией, должны быть менее 0,05 К в верхней тропосфере для более совершенных датчиков и менее 0,1 К в верхней стратосфере.

В работе Nash et al. (2011) приводятся примеры, в которых скорости отклика термисторов-бусинок, использованных в радиозондах во время испытаний, были в большинстве случаев близки или несколько выше значений для термистора с интегральной схемой, представленного в таблице 12.2.

12.3.2 Термисторы

Во всем метеорологическом диапазоне температур электрическое сопротивление большинства чистых металлов практически линейно зависит от температуры. Хотя для термометрии можно использовать многие чистые металлы, для термометров электрического сопротивления наиболее широко используется платина из-за ее исключительной устойчивости к коррозии. Линейный отклик платиновых термометров сопротивления (ПТС) обеспечивает высокую точность калибровки в широком диапазоне температур, необходимом для построения профилей атмосферы. Хорошие стабильные

Таблица 12.2. Типичные постоянные времени для радиозондовых датчиков температуры

Датчик температуры	Начало эксплуатации	τ (1 000 гПа)	τ (100 гПа)	τ (10 гПа)
Термистор с интегральной схемой, ^а 0,4 x 0,8 x 0,8 мм	2003–	≤ 1	≤ 3	≤ 10
Проволочный термоконденсатор, ^а диаметр 0,1 мм	2002–	0,4	1,1	3
Медь-константановая термопара, ^а диаметр 0,06 мм	1991–	< 0,3	< 0,8	2
Другие современные термисторы-бусинки ^а	2005–	≤ 1	≤ 4	5–12

Примечание:

а Постоянные времени на уровне 10 гПа у термисторов с интегральной схемой в Янцзяне, Китай, были больше, чем у медь-константановой термопары почти на 4 с. Другие небольшие термисторы-бусинки имели постоянные времени, которые были на 3—10 с больше, чем у медь-константановой термопары. Проволочный термоконденсатор имел постоянные времени как минимум 4 с, несколько больше, чем результаты лабораторных испытаний, упомянутых выше. Это может быть связано с тем, что в 2007 г. диаметр проволочного термоконденсатора в радиозондах Vaisala RS92 был увеличен за счет включения кварцевой нити, а также может быть обусловлено программным обеспечением, которое было использовано вместе с датчиком в Янцзяне.

свойства ПТС очень полезны при оперативном зондировании, предполагающем длительное хранение радиозондов. ПТС также являются наиболее распространенным типом датчиков температуры для эталонных метрологических измерений.

Некоторые термисторы изготавливаются из керамического материала, сопротивление которого меняется в зависимости от температуры. Датчики обладают высоким сопротивлением, которое понижается с абсолютной температурой. Соотношение между сопротивлением R и температурой T может быть выражено приблизительно следующей формулой:

$$R = A \cdot \exp(B/T) \quad (12.3)$$

где A и B — постоянные величины. Хотя чувствительность к изменениям температуры очень высокая, ответная реакция на изменение температуры далека от линейной, поскольку чувствительность понижается в зависимости от квадрата абсолютной температуры. 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. Нагрев от солнечных лучей у современных термисторов в виде чипа составляет величину около 1°K на 10 гПа.

12.3.3 Термоконденсаторы

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 проводимости этого ферроэлектрического материала составляет порядка 10^{-2} на К. Температурный коэффициент положителен при температурах ниже точки Кюри и отрицателен при температурах выше точки Кюри. Датчики теперь могут иметь диаметр примерно 0,1 мм. Проволочные термоконденсаторы измеряют изменения емкости между двумя тонкими

платиновыми проволоками, разделенными стеклокерамикой (см. Turtiainen, et al., 1995). Такой датчик обладает малой инерционностью и погрешностью, обусловленной нагреванием за счет солнечной радиации, менее 1°K на 10 гПа.

12.3.4 Термопары

В одном из национальных радиозондов применялся датчик температуры с термопарой из меди и константана, использовавшийся во взаимном сравнении 2010 года (Nash et al., 2011), но с тех пор его применение прекращено. Для внешнего соединения термопары используется проволока диаметром 0,05 мм, которая обеспечивает датчику возможность очень быстрого реагирования. Соотношение между термо-ЭДС 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. Для получения точных значений температуры необходимо компенсировать паразитную ЭДС, возникающую на дополнительных соединениях между датчиком и находящимися внутри радиозонда опорными термопарами.

12.3.5 Научные приборы зондирования

Два специальных научных датчика зондирования температуры были размещены во время взаимного сравнения ВМО высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011):

- a) датчик температуры MTR, в котором в качестве чувствительного элемента используется ультратонкая вольфрамовая проволока. Проволока имеет диаметр 0,01 мм, длину 44 см и скручена в спиральную катушку диаметром 0,2 мм с шагом обмотки 0,1 мм. Проволока покрыта алюминием для улучшения отражательной способности и, следовательно, уменьшения нагрева солнцем (см. Shimizu and Hasebe, 2010). Этот датчик имеет меньшую постоянную времени ответной реакции, чем медь-константановая термопара.
- b) мультитермистор, испытанный в Янцзяне, был самостоятельным прибором, основанным на мультитермисторном радиозонде для точного измерения температуры (ATM) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) (см. Schmidlin, 2006; Schmidlin et al., 1995). Система производила измерения при помощи трех алюминированных термисторов, а также одного белого и одного черного термистора. В Янцзяне постоянные времени ответной реакции были близки к тем, которые характерны для современных термисторов-бусинок. На основе измерений пятью датчиками и точных знаний оптических свойств различных покрытий датчиков была определена эталонная температура, а также получены оценки условий солнечного и ИК-излучения. Данная оценка температуры не зависит от какого бы то ни было допущения об обратном рассеянии от поверхности и облаков в отличие от схем коррекции радиозондовой температуры.

Надежность абсолютной калибровки и корректировки на дневное время для этих научных систем в испытаниях в Янцзяне оказались не лучше, чем у работоспособных оперативных радиозондов.

12.3.6 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 ИК-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 конвективного теплообмена. 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.

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, если он не защищен гидрофобным покрытием. Чрезвычайно важно, чтобы конструкция датчика предусматривала эффективный отвод воды или льда. 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. Поглощающая способность датчика температуры в ИК-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 ИК-части спектра, особенно при низких давлениях.

12.3.7 Погрешности измерения температуры

Погрешности в радиозондах более ранних моделей, которые широко применялись в период 1980—2000 гг., рассмотрены более подробно в публикации Nash (2015).

12.3.7.1 Калибровка

Погрешности в значениях температуры, связанные с калибровкой, во время подъема радиозонда могут быть вызваны:

- a) погрешностями калибровки на заводе-изготовителе. Это может порой происходить и является одной из причин, по которой радиозондовые измерения следует проверять на земле до запуска;
- b) небольшими изменениями в датчике, такими как паразитная емкость, связанная с емкостным датчиком, или в электрических присоединениях к датчикам;
- c) нестабильностью в работе системы преобразователя радиозонда и в опорных резисторах во время хранения или подъема радиозонда. Смещение показаний датчика или электронного преобразователя в ходе хранения, как правило, может быть частично откорректировано во время обработки данных с использованием поправок, основанных на предполетных проверках.

В таблице 12.3 в обобщенном виде представлены данные по сравнительной точности датчиков температуры в ночное время для тех датчиков температуры, которые

Таблица 12.3. Систематическая погрешность, погрешность радиозонда и неопределенность ($k = 2$) в ночное время по результатам международных сравнений радиозондов ВМО и других испытаний, связанных с ними (с использованием эталонного мультитермистора АТМ НАСА в качестве произвольного эталона для систематических смещений, при наличии такового)

Датчик температуры	Систематическая погрешность (К)				Погрешность радиозонда		Погрешность ($k = 2$)		
	300	100	30	10	30	10	100	30	10
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	0,2 ±0,5	0,2 ±0,5	-0,3 ±0,7	-0,8 ±0,7	1	1	1-1,7	1-2	1,1-2,5
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	0,1 ±0,1	0 ±0,1	-0,1 ±0,2	-0,1 ±0,2	0,3	0,4	0,3-0,4	0,3-0,6	0,4-0,7
Проволочный термоконденсатор, Vaisala RS92 (Финляндия)	0,05 ±0,1	0,05 ±0,1	0,07 ±0,2	0,07 ±0,2	0,2	0,3	0,2-0,4	0,2-0,5	0,3-0,6
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	0 ±0,1	-0,05 ±0,2	-0,07 ±0,2	-0,07 ±0,2	0,2	0,3	0,2-0,4	0,2-0,5	0,3-0,6
Термистор-бусинка, алюминированный	0 ±0,2	0,1 ±0,2	0,1 ±0,2	0,2 ±0,2	0,2	0,4	0,2-0,5	0,2-0,5	0,4-0,8
Мульти-термисторы АТМ НАСА, которые использовал Ф. Шмидлин	Считается, что отклонение в пределах ±0,1 К				0,2	0,2	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3

находились в эксплуатации в 2013 г. Приведенные результаты соответствуют типовым характеристикам, усредненным как минимум по 15 испытательным полетам. Абсолютная неопределенность эталона в ночное время, по-видимому, была лучше 0,3 К, а результаты для радиозондов с мультитермистором НАСА и Sippican находились в хорошем согласии, как следует из анализа погрешностей.

В тех случаях, когда диапазон систематических погрешностей отнесен к типу радиозонда, этот диапазон представляет собой разброс систематических расхождений, выявленных в ходе ряда испытаний, а также учитывает диапазон вероятной точности до 30 гПа, оцененный результатам радиозондового мониторинга (Elms, 2003). Поскольку современные датчики имеют алюминированное покрытие, погрешности, связанные с влиянием ИК-излучения, очень незначительны, и любой разброс в точности уменьшается, главным образом, благодаря долгосрочной устойчивости калибровки завода-изготовителя, незначительной нестабильности датчика, возможно, обусловленной структурой атмосферы и внутренней температурой радиозондовой электроники и т. п. В таблице 12.3 трудно выделить самые лучшие системы, поскольку перечисленным датчикам присущи аналогичные погрешности. Воспроизводимость результатов измерений температуры может быть оценена достаточно легко, но пока не представляется возможным установить отклонение с лучшей точностью, чем показано в таблице. Крупномасштабные

испытания в тропиках не дали для отклонения результатов, аналогичных тем, которые были получены в Европе, поэтому приведенные значения представляют усреднение между двумя условиями и диапазон значений охватывает оба набора результатов.

В таблице 12.3 погрешности зонда приводятся только для давления 30 гПа и 10 гПа, поскольку для большинства современных датчиков температуры погрешности зонда не сильно различаются между поверхностью земли и уровнем 30 гПа, правда, некоторые системы сталкивались с проблемами вблизи тропопаузы (Nash et al., 2011). В работе Ho et al. (2017) сравниваются температуры по радиозондам с результатами спутниковых данных радиозатмения.

12.3.7.2 **Тепловая инерция**

Большинство современных радиозондовых датчиков температуры характеризуется хорошей инерционностью и не требует значительной корректировки на погрешности, обусловленные тепловой инерцией в тропосфере и нижней стратосфере.

12.3.7.3 **Теплообмен в инфракрасной области спектра**

Большая часть белых красок, используемых для радиозондовых датчиков, обладает сравнительно высокой эмиссионной способностью в ИК-области спектра ($> 0,8$ мкм). Поэтому теплообмен с фоновым ИК-излучением может приводить к возникновению значительных погрешностей в значениях температуры. Для некоторой заданной вертикальной структуры поля температуры потоки ИК-излучения также будут существенно различаться от полета к полету, в зависимости от наличия облачности в районе подъема радиозонда. В работе Luers и Eskridge (1998) приводится хороший пример того, как пользователи пытались смоделировать погрешности, возникающие под влиянием солнечного и ИК-излучения на радиозондах, использовавшихся в 1990-х годах.

Погрешности, возникающие под влиянием ИК-излучения, характерны для наблюдений как в дневное, так и в ночное время. О влиянии погрешностей, возникающих в результате теплообмена в инфракрасной области спектра в ночное время, можно судить по данным измерений, проводившихся с помощью стержневых термисторов (используемых на российских радиозондах), которые представлены в таблице 12.3. При высоком давлении значения температуры, полученные с помощью этих датчиков, близки к образцовым. Однако при низком давлении измеренные значения температуры гораздо ниже, чем образцовые. По данным рассматриваемых испытаний при давлении ниже 30 гПа температура радиационного равновесия в ночное время была обычно значительно ниже фактической температуры атмосферы. Следовательно, ИК-излучение датчика температуры превышало ИК-излучение, поглощавшееся датчиком из окружающей атмосферы, и этот датчик охлаждался до температуры ниже фактической. Дополнительная информация о влиянии погрешностей, обусловленных ИК-излучением, в прошлом содержится в работе Nash (2015).

Использование белой краски на датчиках температуры следует как можно скорее прекратить с тем, чтобы вклад погрешностей, обусловленных ИК-излучением, в систематическую погрешность в измерении температуры был совсем незначительным по всей сети радиозондирования.

12.3.7.4 **Разогрев солнечной радиацией**

Для всех радиозондовых датчиков температуры характерны погрешности, связанные с разогревом при полетах в дневное время под воздействием приходящей солнечной радиации, в том числе отраженной радиации от облаков и поверхности. В таблице 12.4 представлены различные погрешности в дневное и ночное время, связанные с измерениями температуры при помощи радиозондов, указанных в таблице 12.3. Эти значения в основном являются результатом коррекции с помощью программного

Таблица 12.4. Расхождения между дневной и ночной температурами для выбранных датчиков температуры во время проведения международных сравнений радиозондов ВМО и других связанных с ними испытаний

Датчик температуры	Систематическая погрешность (К)			
	300	100	30	10
Давление (гПа)				
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	1	1,8	3,3	5,1
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	0,5 ^a 0,3 ^b	0,75 ^a 0,5 ^b	1,1 ^a 0,75 ^b	1,8 ^a 1 ^b
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	0,3	0,5	0,8	0,95
Проволочный термоконденсатор, Vaisala (Финляндия)	0,15	0,3	0,5	0,8
Термистор-бусинка, ^c алюминированный	0,2–0,5	0,3–1,1	0,4–1,5	0,6–2,3

Примечания:

^a Как используется в Nash et al. (2011)

^b С изменениями, внесенными в ходе последующих испытаний (Philipona et al., 2013)

^c Обзор целого ряда результатов для других систем радиозондирования с использованием термисторов-бусинок в сравнении в Янцзяне (Nash et al., 2011). См. публикацию Nash (2015), в которой подробно описаны конкретные типы радиозондов, использованные в Янцзяне.

обеспечения, которая проводится каждой системой для дневных температур для углов солнца от 30° до 80°. Датчики температуры российских радиозондов имели достаточно слабую теплоизоляцию от опоры, которая могла зачастую разогреваться больше, чем сам датчик, и поэтому российским радиозондам были также присущи большие расхождения между дневными и ночными температурами на высотах.

Во всех современных системах радиозондирования при обработке данных в целях компенсации разогрева солнечной радиацией применяется коррекция с помощью специального программного обеспечения (см. таблицу 12.4). Такие корректирующие схемы обычно разрабатываются на основе специальных исследований расхождения дневных и ночных температур (с учетом реального суточного колебания температуры, вызываемого атмосферными приливами), в сочетании с данными моделей солнечного разогрева и по возможности лабораторных испытаний. Затем соответствующая поправка выражается как функция высоты солнца во время подъема радиозонда. При коррекции можно также учитывать действительную скорость подъема радиозонда, поскольку погрешности, вызванные вентиляцией и разогревом, изменяются, если скорость подъема радиозонда отличается от стандартных условий испытания. При малой высоте солнца (менее 10°) погрешности, обусловленные разогревом, очень чувствительны к ее изменениям. Поэтому в случае, когда корректирующее программное обеспечение не предусматривает обновления данных о высоте солнца во время полета радиозонда, возникают значительные погрешности при коррекции данных, полученных при полетах во время восхода или захода солнца. Простая схема поправок будет эффективно работать только для определенных условий облачности и состояния поверхности и не сможет обеспечить надлежащей коррекции для всех условий полетов, которые могут возникнуть: например, при запуске радиозондов из прибрежных пунктов они нередко оказываются над морем. При ясном небе низкое альbedo поверхности моря приводит к уменьшению отраженной солнечной радиации в два–три раза по сравнению с усредненными атмосферными условиями во время полета. При таких обстоятельствах поправки, предусмотренные в программном обеспечении и основанные на усредненных условиях, будут завышены минимум на 30 %. С другой стороны, при подъеме радиозондов сквозь мощные слои облаков верхнего яруса с очень высоким альbedo обратное рассеяние может быть гораздо больше, чем обычно, и поправки, предусмотренные программным обеспечением, будут недостаточны.

Таблица 12.5. Систематическая погрешность, погрешность зонда и погрешность ($k = 2$) в дневное время для выбранных датчиков температуры во время проведения под эгидой ВМО международных сравнений радиозондов и других связанных с ними испытаний, и по результатам оперативного мониторинга, представленным в публикации Elms (2003)

Датчик температуры	Систематическая погрешность (К)			Погрешность зонда			Погрешность ($k = 2$)		
	100	30	10	100	30	10	100	30	10
Давление (гПа)									
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	0,7 ±0,5	0,5 ±1	-0,7 ±1,3	1	1,2	1,5	1,2-2,2	1,2-2,7	1,5-3,5
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	-0,2 ^a -0,05 ^b	-0,5 ^a -0,2 ^b	-0,8 ^a 0 ^b	0,4	0,4	0,8	0,6	0,9	1,5
Проволочный термоконденсатор, Vaisala (Финляндия)	0 ±0,2	-0,2 ±0,2	-0,3 ±0,3	0,4	0,4	0,4	0,4-0,7	0,4-0,9	0,4-0,9
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	-0,1 ±0,2			0,3	0,3	0,4	0,3-0,6	0,3-0,8	0,4-1,0
Термистор-бусинка, ^c алюминированный	0,1 ±0,2	0 ±0,3	0 ±0,5	0,4-0,8	0,4-1,3	0,4-1,7	0,5-1,0	0,8-1,6	0,4-2,3
Мультитермистор	±0,2	±0,2	±0,3	0,3	0,3	0,4	0,3-0,5	0,4-0,6	0,4-0,7

Примечания:

^a Как используется в работе Nash et al. (2011)

^b С изменениями, внесенными в ходе последующих испытаний (Philipona et al., 2013)

^c Обзор целого ряда результатов для других систем радиозондирования с использованием термисторов-бусинок в сравнении в Янцзяне (Nash et al., 2011). См. публикацию Nash et al. (2015), в которой подробно описаны конкретные типы радиозондов, использованные в Янцзяне.

В таблице 12.5 в обобщенном виде представлены систематические погрешности и погрешности зонда, присущие современным типам радиозондов. Для систематических погрешностей, полученных во время испытания в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011), было сделано предположение, что нулевая систематическая погрешность в Янцзяне находилась посередине между Vaisala/MODEM и LMS/мульти-термистором на 30 и 10 гПа. Это связано с тем, что последующие испытания в США не выявили существенных погрешностей в мульти-термисторной системе, которая использовалась в Янцзяне, то есть, имелись некоторые реальные атмосферные дневные колебания в величине температуры между 30 и 10 гПа в Янцзяне, и их вероятная амплитуда составляла около 0,15 К. В оценках диапазона систематической погрешности в таблице 12.5 было сделано допущение, что стандартизованные корректирующие схемы в программном обеспечении дают разброс возможных отклонений ±30 %. Во время одного испытания радиозонда радиационные условия (облачность, альbedo поверхности) обычно сильно не меняются, так что создается иллюзия, что отклонение определено точно. Однако испытание, проведенное в другом месте, может дать систематические ошибки, которые отличаются гораздо больше, чем на погрешность зонда, обнаруженную во время отдельного испытания.

Значения погрешности радиозонда больше в дневное время, чем в ночное, для всех радиозондов (см. таблицы 12.3 и 12.5). Во время подъема радиозонды вращаются и раскачиваются как маятник, подвешенный к газонаполненной оболочке, и поэтому сечения поглощения датчика меняются по мере того, как датчик вращается. Кроме того, воздух, нагревающийся при соприкосновении либо с держателями датчика, либо с корпусом радиозонда, время от времени обтекает внешний датчик. Если такие возможные явления не исключить при проектировании (например, если датчик температуры устанавливается вблизи корпуса радиозонда, скажем, посередине от верхней до нижней точки корпуса), то можно получить гораздо более значительные погрешности радиозонда в дневное время. Отраженная радиация колеблется от полета к полету с изменением облачности, что также вносит вклад в погрешности зонда в дневное время. Систематические погрешности дневных измерений должны быть наименьшими для радиозондовых систем с наименьшими дневными и ночными различиями (таблица 12.4).

Когда устанавливают температурные датчики над его держателем, воздух, который нагревается при контакте с держателем, проходит над датчиком, как маятник, приводя к положительным всплескам в показаниях температуры в ходе движения радиозонда по кругу во время полета. Подобные всплески могут достигать 1 К на уровне 10 гПа. Эти всплески, вызванные разогревом, могут быть легко выявлены в ходе полета радиозонда на подвесках, используемых в международных сравнениях радиозондов ВМО, поскольку радиозонды вращаются во время полета определенным закономерным образом. В этой ситуации применение соответствующих методов фильтрации полученных значений температуры может устранить до некоторой степени такие положительные всплески. Таким образом фильтрация для базовых наблюдений нескольких систем должна учитываться при изучении погрешностей в измерении температуры радиозондами в дневное время.

Взаимные сравнения ВМО проводились с радиозондами, которые подвешивались по крайней мере 30 м, а чаще всего 40 м ниже оболочки. Однако во многих национальных сетях, например, в Китае, Японии и Российской Федерации, использовались еще более низкие подвесы, что дает дополнительные смещения в дневное время и большие погрешности зонда по сравнению с теми, которые приводятся в таблицах 12.4 и 12.5, особенно при давлении ниже 30 гПа.

Одним из наиболее практичных способов получения поправки на нагрев датчика солнечным излучением является тестирование датчиков с помощью наземных установок, способных моделировать условия от поверхности земли до стратосферы, в которых могут находиться радиозонды. Два независимых лабораторных исследования, проведенных ГРУАН (von Rohden et al., 2022) и Корейским научно-исследовательским институтом стандартов и науки (KRISS) (Lee et al., 2022a), показали, что радиационная поправка датчиков пропорциональна потоку излучения, но отрицательно коррелирует с давлением воздуха и скоростью вентиляции. Свойства воздуха, безусловно, играют доминирующую роль в конвективном охлаждении датчиков, так что передача тепла от датчика к воздуху становится все более облегченной по мере увеличения давления воздуха и скорости вентиляции. Кроме того, радиационная поправка зависит от температуры воздуха, в основном, из-за положительной корреляции между температурой и теплопроводностью воздуха. На симуляторе условий верхних слоев атмосферы в KRISS было показано, что радиационные поправки как для стержневого датчика температуры, так и для бусинкового термистора необходимо увеличить примерно на 20 % при температуре $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с поправками при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при постоянном давлении воздуха 5 гПа (Lee et al., 2022a, 2022b). Эти наблюдения позволяют предположить, что радиационные поправки для датчиков температуры радиозондов могут быть более точными, поскольку лабораторные установки точно моделируют условия, в которых могут находиться радиозонды.

12.3.7.5 **Осаждение льда или воды на датчике**

Еще одним источником возникновения погрешностей при измерении температуры является осаждение воды или льда на датчике температуры. Это явление ведет к психрометрическому охлаждению (эффект смоченного термометра) датчика температуры, как только относительная влажность атмосферы при подъеме радиозонда становится ниже 100 %. Если датчик устроен так, что вода или лед скапливаются на нем, вместо того чтобы быстро удалиться, то значительная часть данных измерений температуры во время подъема может оказаться искаженной. В ночное время наличие слоя льда на датчике приводит к тому, что алюминированный датчик начинает вести себя как окрашенный в черный цвет датчик в ИК-области спектра, что при низком давлении приводит к значительному охлаждению в обычно наблюдающихся условиях.

Более того, когда вода, накопившаяся на датчике, замерзает по мере попадания датчика в более холодные слои воздуха, выделение скрытой теплоты приводит к повышению температуры до 0 °C. Если датчик сначала покрывается льдом, а затем перемещается в более теплые слои воздуха, температура не поднимется выше 0 °C до тех пор, пока лед не растает. Таким образом, к результатам измерений близким к 0 °C во влажных условиях в изотермических слоях следует относиться с некоторой осторожностью.

12.3.7.6 **Вопросы репрезентативности**

Вопросы репрезентативности рассматриваются в работе Nash (2015).

12.4 **ДАТЧИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ**

12.4.1 **Общие аспекты**

Оперативные измерения относительной влажности по всему миру характеризуются широким разбросом точности (от хорошей до неудовлетворительной). Датчики всех типов, перечисленные в таблице 12.7, все еще использовались в некоторых национальных сетях в 2013 г., но некоторые из них с тех пор были сняты с эксплуатации. Наиболее широко использовался двойной емкостный тонкопленочный датчик. Его преемником стал одинарный тонкопленочный конденсатор с подогревом и встроенным датчиком температуры (Jensen et al., 2016). Этот датчик устанавливается снаружи без всякой защиты на кронштейне, который удерживает его над корпусом радиозонда. Другие современные емкостные тонкопленочные датчики, как правило, крепятся тоже на кронштейне, но имеют алюминированное покрытие, защищающее датчик влажности от загрязнения осадками и сводящее к минимуму нагревание от солнечной радиации. Угольные гигристоры и животная пленка не отвечали современным требованиям пользователей и их эксплуатационное применение было прекращено.

Хорошие современные радиозондовые датчики относительной влажности должны измерять относительную влажность с полезной точностью при всех температурах от 40 °C до приблизительно –70 °C. Температуры вблизи тропической и субтропической тропопаузы ниже, чем эти температуры, и радиозондовые датчики могут производить полезные измерения при этих температурах при условии, что применяются определенные поправки (см. ниже). Однако наиболее надежным практическим методом измерения содержания водяного пара при таких низких температурах является гигрометр точки инея (см. Vömel et al. (2007) и результаты взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования (Nash et al., 2011)). Таблица 12.6 представляет диапазон значений давления насыщенного водяного пара по отношению к поверхности воды, который должен быть достижим для возможности проведения измерений относительной влажности на всех уровнях. Для измерений при температуре ниже 0 °C датчики относительной влажности должны быть откалиброваны таким образом, чтобы сообщать значение относительной влажности по отношению к поверхности воды.

Насыщение по отношению к воде не может быть измерено при температурах значительно ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому изготовители должны использовать одну из приведенных ниже формул для расчета давления насыщенного пара по отношению к воде при наиболее низких температурах — Wexler (1976, 1977), Hyland and Wexler (1983) или Sonntag (1994), — а не уравнение Гоффа — Гратча, которое рекомендовано в более ранних публикациях ВМО. Давление насыщенного пара в ледяных облаках при наиболее низких температурах в верхней тропосфере тропиков составляет около 50 % давления насыщенного пара по отношению к поверхности воды, приведенного в таблице 12.6.

Успешное функционирование радиозондового датчика относительной влажности сильно затруднено при очень низких температурах и давлении. Свободный обмен молекулами воды между датчиком и атмосферой затруднен при понижении температуры. Кроме того, загрязнение датчика от воздействия высоких концентраций водяного пара в начале подъема может привести к существенным систематическим погрешностям показаний датчика при наиболее низких температурах. Например, если положительное отклонение в 5 % относительной влажности вызвано загрязнением при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, то это дает положительное отклонение в 40 % при $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$, если загрязнение не устранено вентилированием.

В нижней стратосфере и верхней тропосфере измерения водяного пара должны оцениваться на основе коэффициента перемешивания и относительной влажности. На рисунке 12.3 представлены колебания температуры, относительной влажности и коэффициента перемешивания с высотой, которые были измерены четырьмя различными радиозондовыми датчиками в ходе взаимных сравнений высококачественных систем радиозондирования ВМО (Nash et al., 2011). Непосредственно под тропопаузой относительная влажность была несколько выше, чем насыщение, однако коэффициент перемешивания водяного пара был близким к минимальному и быстро падал с температурой, как и следовало ожидать из таблицы 12.6. Там, где температура растет над тропопаузой, два датчика относительной влажности с большей инерционностью (серая линия) дали гораздо более высокие коэффициенты перемешивания водяного пара чем реально можно было ожидать. Скорректированный датчик и гигрометр с охлаждаемым зеркалом (черная линия) показывает непродолжительный максимум коэффициента перемешивания водяного пара непосредственно над тропопаузой. Маловероятно, что так в самом деле и происходит, и это говорит о том, что относительная влажность, передаваемая с черных датчиков, в этом слое между 48,4 и 50-й минутой завышена приблизительно в 2,5 раза. Возможно, это результат искажения, связанного

Таблица 12.6. Колебания давления насыщенного водяного пара над поверхностью воды в зависимости от температуры согласно работе Sonntag (1994)

<i>Температура ($^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Давление насыщенного пара (гПа)</i>
40	73,9
30	42,5
15	17,1
0	6,1
-15	1,92
-30	0,51
-45	0,112
-60	0,0195
-75	0,0025
-90	0,00023
-100	0,000036

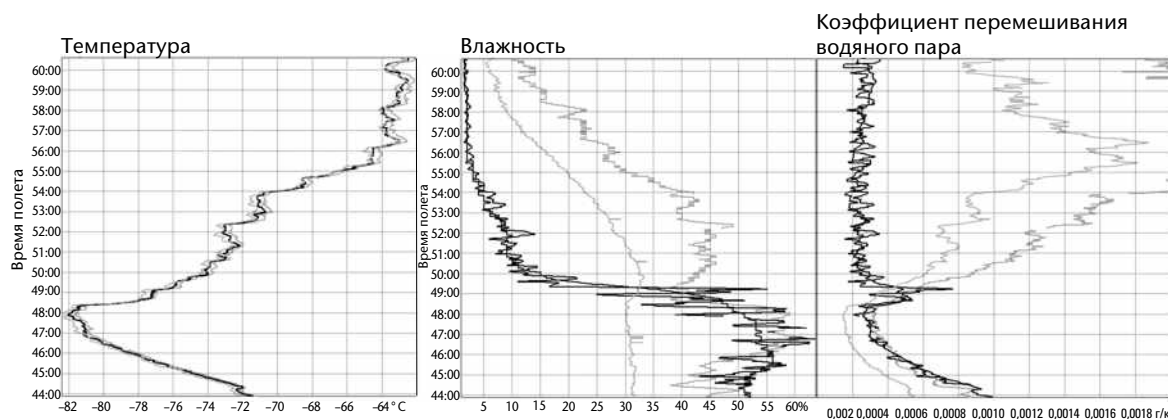


Рисунок 12.3. Температура, относительная влажность и коэффициент перемешивания водяного пара, представленные как функция времени от начала полета, по результатам полета 56 во время взаимного сравнения под эгидой ВМО высококачественных систем радиозондирования. Измерения, представленные серым цветом, производились радиозондами с емкостными датчиками и не корректировались на большую инерционность. Черные линии соответствуют измерениям при помощи обогреваемого двойного емкостного датчика (с коррекцией на постоянную времени) и гигрометра точки инея (гигрометр точки инея характеризуется более значительными колебаниями со временем в относительной влажности и коэффициенте перемешивания, чем двойной обогреваемый емкостный датчик).

с полезной нагрузкой или областью зондирования радиозонда, а не вопрос калибровки. Искажение могло произойти и раньше во время полета радиозонда с 33-й по 38-ю минуту после прохождения мощного слоя перистых облаков, обнаруженных радиолокатором (не показано на рисунке 12.3).

Скорость реагирования датчиков относительной влажности можно записать в виде:

$$dU_e/dt = -1/\tau \cdot (U_e - U) \quad (12.4)$$

где U_e — относительная влажность, передаваемая датчиком, U — фактическая относительная влажность и τ — инерционность датчика.

Все осложняется еще и тем, что датчик относительной влажности передает относительную влажность для температуры самого датчика. Если она отличается от истинной температуры атмосферы, то вносится дополнительная погрешность из-за тепловой инерции датчика влажности по отношению к температуре воздуха. Современные датчики влажности изготавливают гораздо меньшими по размеру по сравнению с радиозондами более старого образца для того, чтобы свести к минимуму эту проблему, и температура датчика в любом случае измеряется напрямую во многих, если не во всех, современных широко распространенных радиозондах.

Инерционность датчика относительной влажности во время подъема радиозонда возрастает гораздо быстрее, чем инерционность датчика температуры. Это видно из таблицы 12.7, в которой представлены приблизительные значения величины постоянной времени для двух датчиков старого образца и трех современных типов датчика. В случае датчика из животной пленки приведенная инерционность относится к изменениям относительной влажности от 70 до 30 %. Инерционность датчиков с животной пленкой при заданной температуре значительно возрастает при очень высокой или очень низкой относительной влажности. Значения для двойного емкостного тонкопленочного датчика (Vaisala RS92) в этой таблице отличаются от тех, которые приводятся в работе Miloshevich et al. (2004), и были взяты из уточненных данных, предоставленных заводом-изготовителем.

На рисунках 12.4 и 12.5 представлены два профиля температуры и относительной влажности, измеренных с помощью радиозонда. Рисунок 12.4 иллюстрирует подъем

Таблица 12.7. Инерционность τ (в секундах) датчиков относительной влажности

Датчик влажности	Используется	τ при 20 °C	τ при 0 °C	τ при -20 °C	τ при -40 °C	τ при -70 °C
Двойной емкостный тонкопленочный датчик без колпачка	2004	< 0,15	0,4	2	10	80
Другие емкостные тонкопленочные датчики с колпачком	2000–	0,1–0,6	0,6–0,9	4–6	15–20	150–300 ^a
Угольный гигристор	1960–	0,3	1,5	9	20	ненадежный
Животная пленка	1950–	6	20	100	> 300	не используется
Криогенный гигрометр точки иней, CFH	2003– для научных целей		< 2 ^b	< 4 ^b		< 25
Гигрометр с охлаждаемым зеркалом Snow White в ночное время	1996– для научных целей		< 2 ^b	< 4 ^b		< 25

Примечания:

^a Значения, полученные во время сравнения с гигрометрами в ходе взаимного сравнения под эгидой ВМО высококачественных систем радиозондирования (Nash et al., 2011); могут быть проблемы с вентиляцией колпачков, защищающих датчик

^b Значение, оцененное по полетному сравнению с наиболее качественными радиозондовыми датчиками относительной влажности, из работы Nash et al. (2011)

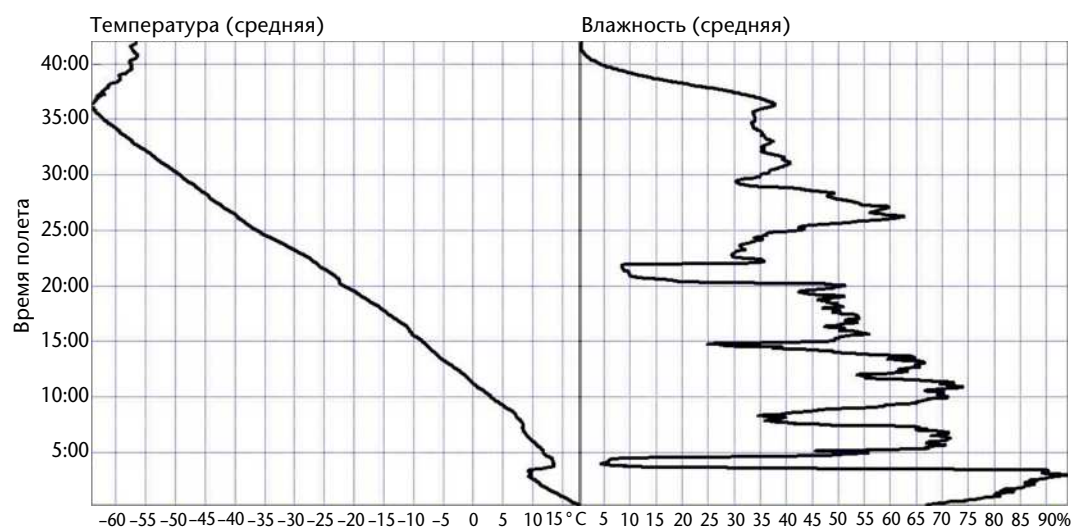


Рисунок 12.4. Средние значения параллельных измерений в первых интервалах двумя радиозондами, подвешенными вместе под одной оболочкой; измерения проводились в ночное время

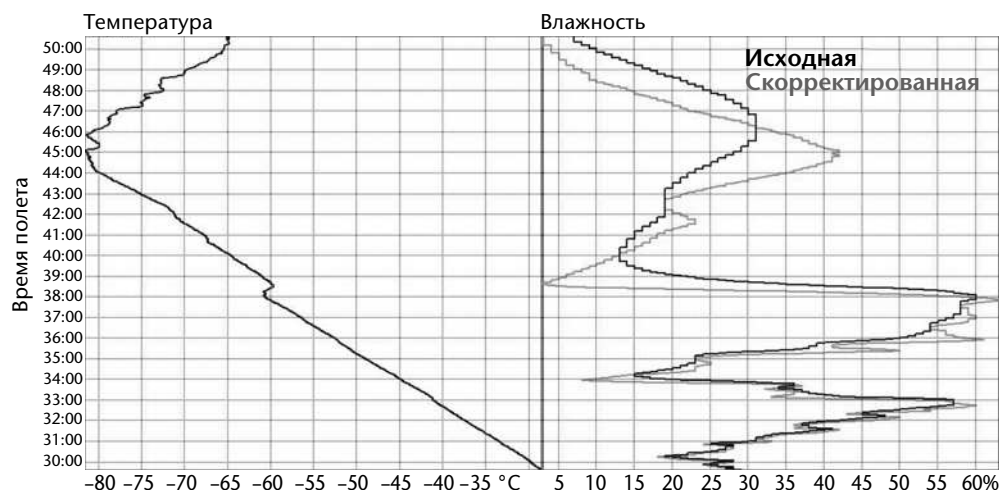


Рисунок 12.5. Измерения при помощи двойного тонкопленочного емкостного датчика в верхней тропосфере в ночное время в Янцзяне, Китай, представлены как функция времени от начала полета, при этом профиль влажности измерялся напрямую датчиком (черная кривая), а затем вносились поправки, учитывающие погрешности, обусловленные инерционностью датчика (серая кривая)

радиозонда в Соединенном Королевстве, когда были объединены результаты измерений от двух различных датчиков. Резкие изменения относительной влажности с высотой происходят во время многих полетов и наблюдались и здесь для радиозондов обоих типов. Очень сухие слои, в частности, связаны с температурной инверсией. Наличие этих очень сухих слоев признается правильным, однако в прошлом они рассматривались как ошибочные, потому что датчики старого образца не могли осуществлять их измерения корректно. В данном случае скорость изменения относительной влажности с высотой над самой нижней инверсией составляла 6 % относительной влажности в секунду. Таким образом, современные датчики дают преимущества для тех, кому нужны подробные данные о колебаниях коэффициента преломления атмосферы с высотой, что имеет значение для распространения радиоволн. На средних уровнях часто наблюдаются скорости изменения, равные 3 % относительной влажности в секунду.

В работе Miloshevich et al. (2004) предложен метод коррекции для большой инерционности датчика, измеряющего влажность, на основе следующего уравнения:

$$U = U_e(t_2) - U_e(t_1) \cdot X / (1 - X) \quad (12.5)$$

где U — относительная влажность окружающей среды, U_e — сообщаемые датчиком значения относительной влажности для времен t_1 и t_2 , при этом считается, что U не изменяется существенным образом между t_1 и t_2 (ограничение размера временного шага), и $X = e^{-(t_2 - t_1)/\tau}$, где τ — инерционность датчика относительной влажности.

Для того чтобы алгоритм давал удовлетворительные результаты, используемые данные должны быть свободны от аномальных данных, шума и т. п. Поэтому контроль качества (КК) в том или ином виде должен быть применен к основным данным наблюдений и поправкам (например, на нагревание датчика влажности под воздействием солнечной радиации) до того, как будет проведена коррекция для инерционности датчика. Эта коррекция не может исправить все детали вертикального профиля относительной влажности с гораздо более высоким разрешением, чем инерционность датчика. Она дает сглаженный вертикальный профиль с более высокими, чем в исходных измерениях, скоростями изменения относительной влажности, однако к любой детали профиля на временных шагах гораздо меньших инерционности датчика следует относиться с осторожностью. Как следует из работы Miloshevich et al. (2004), для конкретного исходного измерения существует немало возможных ответов, согласующихся с известными постоянными времени отклика. Тип сглаживания, применяемый к исходным

данным, влияет на полученный профиль, поэтому применяемое сглаживание должно быть отражено в документах, и допущения, сделанные при использовании алгоритма, должны быть объяснены пользователям.

Из примеров, продемонстрированных в Янцзяне (Nash et al., 2011, приложение D), был сделан вывод, что для регистрации структуры относительной влажности вблизи тропической тропопаузы система измерения давления должна иметь инерционность 3 мин или выше с тем, чтобы поправки на большую инерционность не были слишком большими и не увеличивали погрешность, обусловленную шумом в измерениях или водным/ледяным загрязнением.

Рисунок 12.5 иллюстрирует величину поправок в профиле относительной влажности для датчика с инерционностью около 80 С при -70°C , которая наблюдалась в тропической верхней тропосфере в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011). Скорректированный профиль на рисунке 12.5 явно гораздо более сглаженный, чем профили относительной влажности, измеренные в верхней тропосфере гигрометром с охлаждаемым зеркалом и представленные на рисунке 12.4. В Янцзяне, где применялись поправки на инерционность, результат выглядел более правдоподобным приблизительно в 65 % случаев и совсем неправильным в остальных случаях. Представляется обоснованной необходимость дальнейшего тестирования поправок и сглаживания такого типа.

Во время испытаний в Янцзяне самые высокие скорости изменения, которые наблюдались на границе тропосферы и стратосферы, составляли 30 % относительной влажности за 30 секунд. Таким образом на сегодняшний день даже самые малоинерционные радиозондовые датчики относительной влажности не способны определить истинную высоту, на которой происходит резкое падение влажности в тропической тропопаузе без коррекции. Поправки для высоты на верхней границе влажного слоя в Янцзяне составляли от 200 до 500 м. Однако в Янцзяне были два научных прибора, которые имели меньшую инерционность и могли лучше определять высоту, когда датчики исправно функционировали (см. таблицу 12.7).

12.4.2 Емкостные тонкопленочные датчики

Емкостные тонкопленочные датчики сейчас используются в большинстве конструкций современных радиозондов, причем они часто имеют встроенный датчик температуры (что позволяет устранить радиационное сухое смещение, характерное для датчиков предыдущих поколений). Некоторые системы нагревают датчик влажности, чтобы предотвратить образование на нем льда. Принцип действия этих датчиков основан на изменчивости диэлектрической проницаемости полимерной пленки в зависимости от давления водяного пара в окружающей среде. Нижний электрод конденсатора формируется путем протравливания покрытой металлом стеклянной пластинки, имеющей размеры 5 на 3 мм или 4 на 1,5 мм и толщину 0,5 или 0,2 мм. Зачастую приходится идти на компромисс в отношении толщины, поскольку более тонкая пленка имеет меньшую инерционность при низких температурах, но видимо, меньшую устойчивость функционирования со временем. Верхний электрод 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. Эти датчики всегда крепятся на кронштейне, который обеспечивает положение датчика над радиозондом или на значительном расстоянии от корпуса радиозонда сбоку.

Калибровка этих 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.

Загрязнение в результате воздействия дождя, капель воды в облаках или обледенения необходимо устранять в том случае, если для датчика не предусмотрено никакого защитного колпачка. Это можно обеспечить обогревом датчика до температуры выше температуры окружающей среды. В радиозондах Vaisala RS92 применяются также двойные датчики, в которых в то время, когда один датчик проводит измерение, другой подогревается, а затем охлаждается для нормальной работы (Paukkunen, 1995). Двойные датчики крепятся на расстоянии 1 см друг от друга. Эти датчики имеют тонкое гидрофобное покрытие для сведения к минимуму загрязнения от жидкой воды. Когда солнечный свет попадает прямо на датчики и их держатели, датчики влажности разогреваются по сравнению с истинной температурой, особенно в верхней тропосфере. Этот эффект нагревания необходимо компенсировать для того, чтобы обеспечить точные измерения влажности. Один из возможных методов заключается в прямом измерении температуры датчика влажности и использовании этой информации для компенсации. В более ранних версиях системы таких датчиков печатная плата не имела покрытия с высокой отражательной способностью, и датчик влажности слишком нагревался в верхней тропосфере в дневное время. Поэтому позднее все поверхности держателя были алюминированы и впервые такой образец был испытан на Маврикии (Nash et al., 2006), а затем уже протестирован как прибор для эксплуатации на сети в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011). Вначале изготовитель рекомендовал пользователям использовать этот датчик вместе с корректирующим программным обеспечением для большой инерционности при низких температурах и поправкой на солнечный разогрев датчика в дневное время. Однако большинство последних версий программного обеспечения для системы, предоставляемого изготовителем, предусматривает применение этих поправок автоматически по умолчанию.

В ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО (Nash et al., 2011) четыре радиозонда использовали другой датчик, изготовленный E+E Elektronik. Этот датчик всегда имел защитный колпачок для сведения к минимуму загрязнения. Как правило, колпачок имеет покрытие с высокой отражательной способностью, так что датчик не нагревается слишком сильно в дневное время в верхней тропосфере. Держатели датчика и колпачок не должны быть гигроскопичными, в противном случае газы выделения с этих поверхностей приведет к существенным погрешностям. Некоторые изготовители применяют поправки для большой инерционности. Для данного датчика погрешности, связанные с большой инерционностью, больше, чем в двойных датчиках. Большинство радиозондов, использующих этот датчик, имеют дополнительный термистор для того, чтобы измерять температуру датчика влажности напрямую, а не применять допущение, что датчик влажности находится при той же температуре, что и скорректированный датчик температуры.

12.4.3 Угольные гигристоры и животная пленка

Оба типа датчиков использовались примерно до 2013 года, но вскоре после этого были сняты с производства. Они были подвержены загрязнению облаками и плохо работали при низкой или высокой относительной влажности. Более подробную информацию можно найти в предыдущих версиях этой главы или в работе Nash (2015).

12.4.4 Научные приборы зондирования

Во время взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011) были успешно испытаны два специальных научных прибора для измерения содержания водяного пара. Эти системы по существу не были такими же надежными, как оперативные радиозонды, тем не менее, когда они работали исправно, они были исключительно полезны для выявления ограничений оперативных радиозондов.

- a) Криогенный гигрометр точки инея (CFH) (Vömel et al., 2007) представляет собой гигрометр с охлаждаемым зеркалом. В гигрометре используется контур обратной

связи, предназначенный для активного регулирования температуры небольшого зеркала, которое покрывается льдом (или росой в нижней тропопаузе). В контуре обратной связи оптический детектор определяет количество льда, покрывающего зеркало, и регулятор с обратной связью регулирует температуру зеркала таким образом, что количество льда остается постоянным.

Когда регулятор с обратной связью работает исправно, температура зеркала равна температуре точки инея, а если отсутствует загрязнение льдом/водой, тогда и температуре атмосферы. Впускные патрубки криогенного гигрометра точки инея изготовлены из нержавеющей стали, имеют длину 17 см и диаметр 2,5 см и расположены непосредственно над и под самим гигрометром. Это сделано для того, чтобы загрязнение от воздуха, проходящего через гигрометр, было минимальным, и результаты испытаний в Янцзяне подтвердили, что загрязнение криогенного гигрометра точки инея ниже, чем гигрометра с охлаждаемым зеркалом Snow White в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

Инерционность прибора колеблется от нескольких секунд в нижней тропосфере, увеличиваясь с высотой до 20—30 с в стратосфере. Таким образом, в нижней тропосфере инерционность не отличается от лучших оперативных радиозондов. Однако в верхней тропосфере и нижней стратосфере инерционность меньше, чем у лучших эксплуатируемых радиозондов. Основная погрешность измерений при помощи CFH связана со стабильностью и дрейфом регулятора с обратной связью. Общая погрешность измерений оценивается в 0,5 К для температуры точки росы или точки инея, что соответствует приблизительно 9 % относительной влажности в тропической тропопаузе и 4 % относительной влажности в нижней тропосфере.

В криогенном гигрометре точки инея используется холодная жидкость при температуре ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для охлаждения зеркала во время полета. Подготовка и охлаждение этой жидкости до полета требует обучения и знания техники безопасности во избежание причинения вреда здоровью.

Для схем коррекции (солнечного разогрева, инерционности), применяемых к измерениям относительной влажности оперативными радиозондами в верхней тропосфере, было полезным сравнение с результатами измерений с помощью криогенного гигрометра точки инея, например, неопубликованные сравнения в рамках Проекта по проверке достоверности результатов измерения содержания водяного пара в верхней тропосфере и нижней стратосфере по линии Фонда по изучению проблем атмосферы и биосферы Лапландии в Соданкюля, Финляндия (2004), и взаимное сравнение аэрологических методов в Линденберге, Германия (2008).

- b) Гигрометр «Snow White» также основан на принципе охлаждаемого зеркала для измерения содержания водяного пара (Fujiwara et al., 2003). Но в нем используется охладитель Пельтье для охлаждения зеркала. Существует два варианта размещения системы. В дневное время гигрометр-зеркало устанавливается в шахту измерительной системы. Такая конфигурация не исключает загрязнения, что сказывается на точности измерений при температурах ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, и она была применена всего в нескольких полетах в Янцзяне. При ночном варианте гигрометр-зеркало крепился над корпусом радиозонда. Таким образом гигрометр-зеркало ночью имел недостаточную прямую защиту от загрязнения, но был очень удачно размещен для измерения условий окружающей среды. В Янцзяне система «Snow White» в ночное время измеряла температуры точки росы до $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 70 % ночных полетов. Во время двух дневных полетов произошло сильное загрязнение в условиях приближающейся грозы после полудня, а вот в ночное время измерительные системы «Snow White» не подвергались загрязнению в верхнем ярусе облаков, поскольку тогда условия подъема были благоприятны для функционирования датчиков «Snow White». Однако в Янцзяне загрязнение вокруг корпуса гигрометра ограничивало использование измерительной системы «Snow White» высотами ниже 18 км, непосредственно над тропической тропопаузой. Система «Snow White» имеет те же

преимущества, что и криогенный гигрометр точки инея в отношении инерционности, которая гораздо меньше, чем у оперативных датчиков влажности в верхней тропосфере.

Необходимо присутствие квалифицированного оператора, который способен распознать, когда зеркальная пленка переходит с водной фазы в ледяную (вместе с системой «Snow White» в полете необходимо использовать хороший оперативный датчик влажности). Оператор должен быть способен обнаружить возможные виды неисправностей (такие как исчезновение ледяной пленки на зеркале) в средней или верхней тропосфере. Умение обнаружить, когда происходят искажения в измерениях гигрометра, требуется как для системы «Snow White», так и криогенного гигрометра точки инея.

Два гигрометра с охлаждаемым зеркалом имеют преимущество перед датчиками относительной влажности в том, что они более чувствительны в верхней тропосфере и нижней стратосфере до самых низких температур, при условии, что данные измерений с искажениями распознаются и исключаются. Измерения этими приборами, кроме этого, не имеют существенных различий в точности в дневное и ночное время. Поэтому использование измерений данных датчиков в качестве рабочих эталонов оказалось наилучшим методом выявления таких расхождений. Сравнение с измерениями при помощи охлаждаемого зеркала позволило разработать процедуры коррекции или изменить оперативные процедуры в целях обеспечения оперативных измерений более высокого качества в средней и верхней тропосфере.

Размещение датчиков в шахте не является лучшим методом наблюдения за структурой относительной влажности во время дождя и низкой облачности, поэтому необоснованно считать датчики с охлаждаемым зеркалом более надежными, чем самые лучшие датчики оперативных радиозондов в нижней тропосфере.

12.4.5 **Размещение датчиков**

При подъеме радиозонда обычным является быстрое изменение относительной влажности на более чем 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 же датчики могут нагреваться для удаления загрязнений от воды или льда в облаках или тумане.. Конструкция защитного колпачка может иметь очень большое значение, ведь необходимо, чтобы колпачок не мешал датчику влажности хорошо вентилироваться воздухом во время подъема радиозонда.

Защитные оболочки или покрытия шахты не должны изготавливаться из гигроскопических материалов. Примерами могут служить входные патрубки криогенных гигрометров точки инея, которые изготавливаются из нержавеющей стали, или алюминированные держатели датчиков на некоторых эксплуатируемых радиозондах.

12.4.6 **Погрешности измерений относительной влажности**

12.4.6.1 **Общие аспекты**

Оперативные датчики относительной влажности были значительно усовершенствованы по сравнению с датчиками, которые применялись до 1980-х годов, особенно при низких температурах в средней и верхней тропосфере. Результаты наблюдений за относительной

влажностью при температуре ниже -40°C не передавались большинством более ранних систем радиозондирования, а сообщаемые значения относительной влажности при таких температурах не очень широко использовались приблизительно до 2000 г.

При испытаниях радиозондов не следует исходить из предположения, что неопределенность измерений одинакова для всех диапазонов относительной влажности. Неодинаковая точность по диапазону относительной влажности была отмечена для многих систем при взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО (Nash et al., 2011). Вместе с тем, более совершенные системы в настоящее время обеспечивают гораздо более ровные измерения, чем наблюдалось в начале проведения серии сравнений радиозондов в 1984 г. В ходе изготовления калибровка индивидуальных датчиков часто осуществляется лишь при нескольких (менее трех) заранее установленных значениях относительной влажности и зачастую лишь при одном значении температуры (см., например, Wade, 1995). Во многих случаях температурная зависимость калибровки датчика не проверяется для отдельных датчиков или партий датчиков, а считается соответствующей характеристике, определенной в ходе ограниченного числа испытаний. Калибровка датчиков относительной влажности из различных партий часто различается на несколько процентов, как это можно видеть из данных измерений в облаках нижнего яруса (Nash et al., 1995). Это может быть результатом неправильной процедуры калибровки во время изготовления датчиков. Например, характеристики реального датчика в какой-либо выбранной партии могут отличаться от стандартных характеристик калибровки, соответствующих предварительно установленным в ходе испытаний значениям влажности. С другой стороны, это может быть результатом различий в стабильности датчиков из разных партий во время хранения. Помимо этого, толщина пленки в некоторых емкостных тонкопленочных датчиках не всегда одинаковая, и датчики большей толщины иногда не так хорошо реагируют на изменения влажности при низких температурах, в то время как большинство датчиков того же типа эффективно реагируют в тех же условиях. Сравнение данных о влажности с радиозонда со спутниковыми данными и полями ЧПП проведено Moradi et al. (2013), Sun et al. (2021) и Ingleby (2017).

Измерения влажности в ночное время могут быть менее надежными, чем измерения в дневное время, поскольку во многих случаях существует более высокий шанс загрязнения вокруг датчика в ночное время, если вентиляция недостаточно хорошая, в то время как днем нагревание солнцем среды, окружающей датчик, уменьшает большую часть искажений. На верхних уровнях реакция прибора медленная; это может быть компенсировано с помощью поправки на временной лаг (Miloshevich et al., 2004, и 12.4.1 выше). В различных емкостных датчиках наблюдалось дневное радиационное сухое смещение (см. Vömel et al., 2007; Wang et al., 2013; Dirksen et al., 2014); сейчас эта проблема в основном решена путем добавления отдельного датчика температуры к датчику влажности.

Систематические погрешности в данных измерений относительной влажности могут возникать из-за изменений в калибровке при хранении датчиков. Это может быть связано просто со старением датчика или накоплением химического загрязнения, когда загрязнение занимает места, которые обычно бывают открыты для молекул водяного пара. Скорость, с которой происходит загрязнение, может зависеть от химических веществ, использованных для изготовления корпуса радиозонда или упаковки, и ее нельзя считать одной и той же, если со временем меняется процесс изготовления корпуса радиозонда или печатных плат. Обязательно следует тщательно выполнять инструкции изготовителя в отношении хранения датчиков и их подготовки к использованию. В некоторых случаях в процессе наземной предполетной проверки предотвращается накопление химического загрязнения, которое могло бы вызвать отклонение при подъеме в измерениях.

Начиная с 2005 г. и даже больше с 2014 года, большинство современных датчиков влажности демонстрируют более высокую устойчивость и защиту от загрязнения водой в облаках (эффекты загрязнения обычно носят непродолжительный характер и не приводят к постоянным смещениям во время подъема) и лучшую воспроизводимость результатов от серии к серии. Таким образом результаты, полученные в сухих и влажных условиях, теперь можно совмещать, за исключением случаев очень сильного дождя, когда ни одна система не работает надежно. Таким образом для более совершенных типов

датчиков неопределенности ($k = 2$) в диапазоне от 5 до 10 % представляются достижимыми по всему диапазону относительной влажности. В работе Nash (2015) представлена подробная информация о функционировании датчиков влажности примерно в 2010 году и ранее.

Большинство тонкопленочных датчиков влажности имеют температурную зависимость, поскольку принцип их измерения основан на адсорбции водяного пара. Адсорбционная способность тонких пленок для водяного пара отрицательно коррелирует с температурой, в то время как количество водяного пара в воздухе, как правило, положительно коррелирует с температурой. Эти два параметра играют противоположные роли при адсорбции водяного пара в датчиках, особенно если температура значительно отличается от температуры калибровки датчика. Лабораторный эксперимент показал, что при измерении относительной влажности при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью генератора влажности на основе сатуратора при использовании калибровочной кривой, полученной при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, результат был примерно на 10 % ниже эталонного (Lee et al., 2019). Отклонение увеличивалось по мере дальнейшего понижения температуры. Эти наблюдения показывают, что эффект уменьшения водяного пара при низких температурах доминирует над эффектом увеличения адсорбционной способности водяного пара. Поэтому настоятельно рекомендуется калибровать тонкопленочные датчики влажности при различных температурах и компенсировать возможную температурную зависимость.

12.4.6.2 ***Увлажнение или обледенение в облаке***

Датчики влажности могут загрязняться при прохождении через облака. В некоторых системах датчики с подогревом предотвращают или уменьшают этот эффект, в то время как датчики без подогрева могут иметь положительное отклонение (влажность слишком близка к насыщению), пока загрязнение не выветрится. Обледенение в облаке может происходить при температурах гораздо ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, и оно не так быстро устраняется вентилицией, как загрязнение в нижней тропосфере.

12.4.6.3 ***Вопросы репрезентативности***

Вопросы репрезентативности рассматриваются в работе Nash (2015).

12.5 **ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ВКЛЮЧАЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ)**

12.5.1 **Общие аспекты**

Радиозондовые датчики давления должны обеспечивать точность в очень широком динамическом диапазоне от 1080 до 3 гПа, с разрешением 0,1 гПа на большей части диапазона и с разрешением 0,01 гПа для давлений менее 100 гПа. Изменения давления определяются, как правило, по небольшому электрическому или механическому изменению. Например, типичная максимальная деформация анероидной коробки составляет примерно 5 мм, поэтому 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 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 неопределенности, обусловленные инерцией датчика, незначительны.

Исторически, когда производились надежные датчики давления для низкого давления, датчики с неудовлетворительной точностью заменяли измерениями давления, рассчитанными из высоты радиолокатора, как, например, в Соединенном Королевстве до 1978 г. В Российской Федерации и некоторых сопредельных странах для измерения геометрической высоты вместо датчика давления на радиозонде используются вторичные радиолокаторы.

В настоящее время многие современные системы радиозондирования используют навигационные сигналы ГНСС для определения положения радиозонда и уже не используют датчики давления на радиозондах (для экономии средств на расходные материалы). В результате геометрическая высота, а значит и геопотенциальная высота, определяется напрямую (см. [раздел 12.5.5](#)), а изменения в давлении во время полета вычисляются из радиозондовых измерений температуры и влажности.

12.5.2 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. В этом случае полость будет работать как датчик давления, при этом атмосферное давление будет определяться по отклонению тонкой кремниевой крышки.

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.

12.5.3 Анероидные коробки (емкостные)

Во многих современных конструкциях радиозондов используются анероидные коробки меньшего диаметра (30 мм или 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:

$$C = \epsilon \cdot S / e \quad (12.6)$$

где S — площадь поверхности каждой пластины, e — расстояние между пластинами и ϵ — диэлектрическая постоянная. 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 ϵ уменьшается при понижении давления. Чувствительность емкостного датчика определяется по формуле:

$$- \epsilon \cdot S / e^2 \cdot de / dp \quad (12.7)$$

Чувствительность будет самой высокой, когда ϵ 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 1 000 гПа. Значение емкости, как правило, близко к 6 pF.

Емкостные анероидные коробки обычно соединены с электронным RC-генератором с соответствующими опорными конденсаторами. Такая конструкция необходима для измерения очень малых колебаний емкости (например, 0,1 % при максимуме в 6 pF) без каких-либо значительных нарушений в работе генератора за счет изменений температуры, подводимого питания или в результате старения. Такой высокой устойчивости работы генератора трудно достичь при низкой цене. Однако одно из решений может заключаться в переключении входных сигналов, поступающих в генератор от датчика давления и от двух опорных конденсаторов. Опорный конденсатор C_1 подсоединяется к генератору самостоятельно, затем параллельно с конденсатором датчика давления C_p , и затем параллельно со вторым опорным конденсатором C_2 для того, чтобы обеспечить полномасштабный образцовый прибор.

Калибровка анероидного емкостного датчика будет, как правило, в значительной степени зависеть от температуры. Это может быть компенсировано либо путем сличения с внешним конденсатором, обладающим аналогичным температурным коэффициентом, либо путем использования во время обработки данных в наземных системах калибровочных коэффициентов, установленных при калибровке на предприятии-изготовителе. Поправка, применяемая при обработке данных, будет зависеть от внутренней температуры, измеряемой близко к месту нахождения датчика давления. На практике для достижения необходимой точности, возможно, следует использовать оба метода компенсации.

12.5.4 Погрешности датчиков давления

Систематические погрешности и погрешность радиозонда (изменение от полета к полету при $k = 2$) были определены по данным международных сравнений радиозондов ВМО для выбранных типов радиозондов. Полученные результаты представлены в таблице 12.8. Диапазон значений систематической погрешности обычно представляет разброс результатов нескольких испытаний.

Анероидные коробки подвержены изменению калибровки, если только они перед использованием не были надлежащим образом выдержаны в течение многих циклов изменения давления в их рабочем диапазоне. Коррекция с помощью программного обеспечения, проводимая во время обработки данных, но основанная на показаниях, полученных при наземном контроле перед запуском, позволяет несколько уменьшить эти погрешности. Однако поправки на основе проверок перед запуском радиозонда вводятся по фиксированной схеме коррекции погрешностей по всему рабочему диапазону. На практике изменение в калибровке датчика давления было более изменчивым по всему рабочему диапазону.

О последствиях погрешностей в измерении давления, представленных в таблице 12.8, для сообщаемых данных о температуре можно судить по тому факту, что погрешность измерения давления в 1 гПа приводит к ошибке в данных о температуре, равной в среднем $-0,1$ К на уровне 900 гПа, $-0,3$ К в верхней тропосфере (на уровне 200 гПа в тропиках), $\pm 0,5$ К на уровне 30 гПа (с изменением зависимости от летних или зимних условий примерно на 55°C . ш.) и, по меньшей мере, до 1 К для большинства ситуаций на уровне 10 гПа.

Таблица 12.8. Диапазон систематической погрешности и погрешности радиозонда (от полета к полету, $k = 2$) и общая неопределенность в измерении давления при международных сравнениях радиозондов ВМО и связанных с ними испытаниях

Тип радиозонда	Систематическая ошибка			Погрешность зонда			Неопределенность		
Давление (гПа)	850	100	10	850	100	10	850	100	10
MRZ ^a (Российская Федерация)	от −1,5 до −0,5	−1,2 to −0,8	0 – 0,2	7	3,5	0,5	8	4	0,7
Meisei RS2-91	0,2 – 1	−0,1 – 0,5	−0,2 – 0,2	1	0,6	0,6	2	1,1	0,8
VIZ MKII	0 – 1	0,7 – 1,1	0,3 – 0,7	1,6	0,6	0,4	2,5	1,6	1
Vaisala RS92, кремниевый датчик	< 0,5	< 0,3	< 0,2	0,8	0,4	0,2	1	0,6	0,4
MODEM M2K2 ^a	от −0,8 до −0,4	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,6	0,4	0,05
Vaisala RS92 ^a	< 0,5	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,6	0,4	0,05
Lockheed Martin Sippican (LMS), ^a LMG-6	< 0,5	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,2	0,4	0,05

Примечание:

а Датчик давления не используется, давление вычисляется из измерений геопотенциальной высоты, см. раздел [раздел 12.5.5](#).

12.5.4.1 Соотношение погрешностей в значениях геопотенциальной высоты и погрешностей в значениях давления

Погрешность $\varepsilon_z(t_1)$ в значении геопотенциальной высоты в заданный момент времени при полете определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_z(t_1) = \frac{R}{g} \int_{p_0}^{p_1} \left[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p) \right] \frac{dp}{p} + \frac{R}{g} \int_{p_1}^{p_1 + \varepsilon_p(p_1)} \left[T_v(p) + \varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p) \right] \frac{dp}{p} \quad (12.8)$$

где p_0 — давление у поверхности; p_1 — истинное давление в момент времени t_1 ; $p_1 + \varepsilon_p(p_1)$ — измеренное давление, указываемое датчиком радиозонда в момент времени t_1 ; $\varepsilon_T(p)$ и $\varepsilon_p(p)$ — погрешности радиозондовых измерений соответственно температуры и давления как функции давления; $T_v(p)$ — виртуальная температура при давлении p ; а R и g — газовая и гравитационная постоянные, указанные в [Техническом регламенте](#) ВМО (ВМО-№ 49), том I, приложение А.

Для указанной стандартной изобарической поверхности p_s второй член в уравнении 12.8 исчезает, поскольку не существует погрешности в определении p_s , и, следовательно, погрешность в значении геопотенциальной высоты на стандартной изобарической поверхности сокращается и приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_z(p_s) = \frac{R}{g} \int_{p_0}^{p_s} \left[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p) \right] \frac{dp}{p} \quad (12.9)$$

и для радиозондов без датчика давления с использованием радиолокатора:

$$\varepsilon_z(p_s) = T_v(p_s) \int_{z_0}^{z_{ps}} g / T^2 [\varepsilon_T(z) + \varepsilon_z(Range, \theta) \cdot dT_v / dz] \quad (12.10)$$

где Z_{ps} — геопотенциальная высота на данной изобарической поверхности p_s , и погрешность в значении геопотенциальной высоты для радиолокатора является функцией наклонной дальности и угла места (θ) и колеблется от полета к полету согласно режиму ветра.

В таблице 12.9 представлены погрешности определения геопотенциальной высоты, которые возникают из-за погрешностей датчиков радиозонда, для типичных атмосферных условий. Из таблицы видно, что значения геопотенциала на заданных изобарических поверхностях определяются с небольшими погрешностями, которые связаны с погрешностью измерения температуры или давления радиозондом. Погрешность в измерении давления имеет несколько различный эффект на различных широтах, поскольку структура типичных профилей температуры меняется с широтой. Однако те же самые погрешности датчиков давления дают гораздо большие погрешности в определении высоты конкретных структур, таких как температурная инверсия, в том числе в тропоспаузе, а также верхней и нижней границы облаков.

Важность уравнений 12.9 и 12.10 заключается в том, что погрешности в определении геопотенциальной высоты на стандартной изобарической поверхности главным образом связаны с погрешностями в измерении температуры, и таким образом, если сравнить геопотенциальные высоты с совмещенными данными в нулевом приближении из ЧПП, то аномалии высоты дадут представление об относительной точности определения температуры в двух точках (см. Elms, 2003).

12.5.5 **Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления**

12.5.5.1 **Общие положения**

Радиозонды с ГНСС, которые декодируют спутниковые сигналы глобальной системы определения местоположения, могут предоставлять данные о геометрической высоте в отличие от первых радиозондов с ГСОМ, которые не декодировали эти сигналы. Эти измерения геометрической высоты достаточно точны (между 10 и 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 (см. уравнения 12.17 и 12.18). В системах ГНСС в качестве эталона высоты используется эллипсоид, и необходимо делать поправку на разницу между геоидом (СУМ) и эллипсоидом; это явление называется волнистостью геоида. Рассчитанное значение давления будет более точным, чем измерения в стратосфере с помощью самых лучших радиозондовых датчиков давления (см. таблицу 12.8).

Исключение датчика давления из радиозондов с технологией ГСОМ должно обеспечить значительное снижение стоимости радиозондов, однако при этом необходимо учитывать потребности пользователей в данных для все чаще применяемых 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.

12.5.5.2 **Метод расчета**

Перевод геометрической высоты, измеренной при помощи радиозонда с технологией ГСОМ, в геопотенциальную высоту представляет собой функцию поля силы тяжести в данной точке и не зависит от профилей температуры и влажности в данной точке.

Энергия гравитационного потенциала (Φ_1) единицы массы чего бы то ни было — интеграл нормальной силы тяжести от среднего уровня моря ($z = 0$) до высоты радиозонда ($z = z_1$), и записывается уравнением 12.11:

$$\Phi_1 = \int_0^{z_1} \gamma(z, \varphi) \cdot dz \quad (12.11)$$

где $\gamma(z, \varphi)$ — нормальная сила тяжести над геоидом. Это функция геометрической высоты z и геодезической широты φ .

Таблица 12.9. Систематические погрешности в определении геопотенциальной высоты (гп. м) при заданных погрешностях давления и температуры

	ε_T погрешность T (K)	ε_P погрешность P (гПа)	Широта	300 гПа	100 гПа	30 гПа	10 гПа
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность температуры	0,25	0	Все	9	17	26	34
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	25° с. ш.	3	12	–2	–24
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. лето	3	5	1	–20
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. зима	3	5	6	–4
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	25° с. ш.	27	72	211	650
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. лето	26	72	223	680
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. зима	26	70	213	625

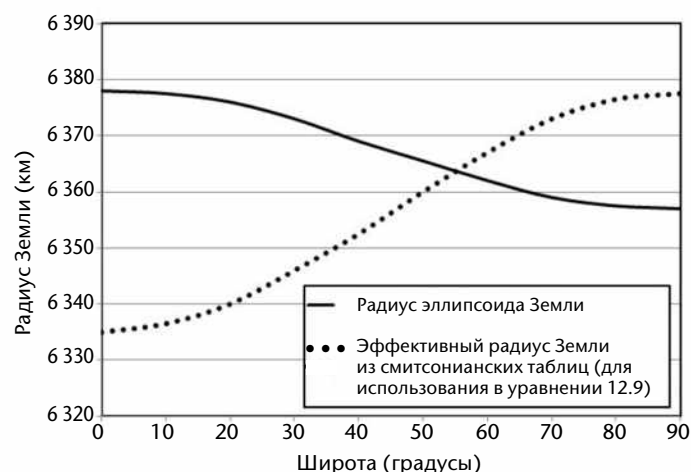


Рисунок 12.6. Колебания радиуса Земли с широтой в сравнении с колебаниями радиуса из таблиц Смитсоновского института, использованного в уравнении 12.13

Для того чтобы получить геопотенциальную высоту, используемую ВМО, этот геопотенциал делят на нормальную силу тяжести на широте 45° следующим образом:

$$Z_1 = \Phi_1 / \gamma_{45^\circ} \quad (12.12)$$

где γ_{45° — по определению равна $9,80665 \text{ м с}^{-2}$. Следует отметить, что сила тяжести на поверхности самая большая на полюсах ($9,832 \text{ 18 м с}^{-2}$), а самая малая — на экваторе ($9,780 \text{ 33 м с}^{-2}$).

Изменение силы тяжести с высотой должно учитывать эллипсоидную форму Земли и вращение Земли. Однако в случаях, когда учитывалось изменение γ с высотой, геопотенциальная высота Z_1 на геометрической высоте z_1 была аппроксимирована с использованием метеорологических таблиц Смитсоновского института (List, 1968) как:

$$Z_1(z_1, \varphi) = (\gamma_{\text{SMT}}(\varphi) / \gamma_{45^\circ}) \cdot ((R_{\text{SMT}}(\varphi) \cdot z_1) / (R_{\text{SMT}}(\varphi) + z_1)) \quad (12.13)$$

где $R_{\text{SMT}}(\varphi)$ — эффективный радиус Земли для широты (φ), эта величина содержится в метеорологических таблицах Смитсоновского института и была выбрана для учета фактических изменений с геометрической высотой в совмещенных гравитационных и центробежных силах. Она не является фактическим радиусом Земли на данной широте. Как показано на рисунке 12.6, на котором смитсоновский радиус увеличивается от экватора к высоким широтам, но фактический радиус эллипсоида Земли самый большой на экваторе и самый малый на полюсах.

Поскольку величины $R_{\text{SMT}}(\varphi)$ в смитсоновских таблицах были получены приблизительно в 1949 г., в вычислениях использовался Международный эллипсоид 1935 года, а не Всемирная геодезическая система 1984 года (WGS-84), которая в настоящее время используется в приемниках ГСОН. Кроме того, в смитсоновских таблицах использовалось следующее значение $\gamma_{\text{SMT}}(\varphi)$:

$$\gamma_{\text{SMT}}(\varphi) = 9,806 \text{ 16} \cdot \left(1 - 0,002 \text{ 637 } 3 \cdot \cos(2\varphi) + 0,000 \text{ 005 } 9 \cdot \cos(2\varphi)^2\right) \left[\text{м с}^{-2}\right] \quad (12.14)$$

Эта формула не представлена широко в открытой научной литературе, несмотря на то, что была рекомендована для использования в метеорологии Международной ассоциацией геодезии в 1949 г.

Таблица 12.10. Различия между геопотенциальной и геометрической высотами, измеренными во время взаимного сравнения радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, на 22° с. ш.

<i>Геопотенциальная высота</i>	<i>Геопотенциальная — геометрическая высота</i>
8 000	–25
16 000	–70
24 000	–135
32 000	–220

Альтернативное выражение для соотношения в уравнении 12.13 было предложено Махони (личное сообщение) на основе геоида WGS-84. В этом случае геопотенциальная высота для геометрической высоты z_1 записывается как:

$$Z_1(z_1, \varphi) = (\gamma_s(\varphi) / \gamma_{45^\circ}) \cdot ((R(\varphi) \cdot z_1) / (R(\varphi) + z_1)) \quad (12.15)$$

где $\gamma_s(\varphi)$ — нормальная сила тяжести на поверхности эллипсоида вращения, и где:

$$\gamma_s(\varphi) = 9.780\,325 \cdot \left((1 + 0.001\,931\,85 \cdot \sin^2(\varphi)) / (1 - 0.006\,694\,35 \cdot \sin^2(\varphi))^{0.5} \right) \quad (12.16)$$

где радиус $R(\varphi) = 6\,378\,137 / (1,006\,803 - 0,006\,706 \cdot \sin^2(\varphi))$, что дает результаты для R , близкие к значениям в таблицах Смитсоновского института.

Если геопотенциальная высота для геометрической высоты 30 км получена вычислениями, то она составляет от 29,7785 км на экваторе до 29,932 км на широте 80° с. ш., если используются уравнения 12.13 и 12.14, или 12.15 и 12.16. Разница в значениях геопотенциальной высоты, полученных двумя методами, составляет менее 1 м и по сути не является критичной для метеорологов.

Разница в значениях геометрической высоты и геопотенциальной высоты увеличивается с высотой над поверхностью Земли. Например, типичные различия в значениях, полученных в измерениях в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай, на широте 22° с. ш., представлены в таблице 12.10.

Если определены изменения геопотенциальной высоты относительно температуры и относительной влажности, то можно рассчитать давление путем интегрирования из измеренного давления на поверхности с использованием гипсометрического отношения в дискретной форме:

$$\ln(p_{i+1} / p_i) = -9,806\,65 \cdot dZ / R^* \cdot T_v \quad (12.17)$$

где $\ln()$ — натуральный логарифм; p — давление в гПа; R^* — газовая постоянная для сухого воздуха; T_v — средняя виртуальная температура для слоя в градусах К; dZ — толщина слоя в геопотенциальной высоте; а I обозначает нижнюю границу этого слоя.

Виртуальная температура T_v рассчитывается из:

$$T_v = T / (1 - (U/100) \cdot (e_s(T)/p) \cdot (1 - \varepsilon_a)) \quad (12.18)$$

где U — относительная влажность воздуха, e_s — давление насыщенного водяного пара и ε_a — отношение молекулярного веса влажного и сухого воздуха, при этом $\varepsilon_a = 0,622$.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что температура и относительная влажность, определенные радиозондом, используются только в расчетах давления для систем, использующих ГНСС-измерения геометрической высоты, поскольку геопотенциальные значения получают просто из геометрической высоты и гравитационного поля Земли.

Алгоритмы для вычисления геометрической высоты по данным радиолокационных наблюдений за ветром с учетом наклонной дальности и угла места с последующим преобразованием геометрической высоты в геопотенциальную высоту включены в работу Ноорег (1986). Оперативный алгоритм, используемый во вторичных радиолокационных системах в Российской Федерации, приведен в работе Иванова и др. (1991). 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 потребоваться коррекция высоты с учетом условий, характерных для каждого индивидуального полета радиозонда.

12.5.6 **Источники погрешностей при прямом измерении высоты**

12.5.6.1 **При определении геометрической высоты с помощью ГНСС**

При отсутствии местных помех на частотах навигационного сигнала ГНСС большинство современных систем радиозондирования могут определять высоты с хорошей точностью по отношению к высоте, на которой в полете происходит блокирование ГНСС. Правда, при этом программное обеспечение должно надежно интерполировать на поверхность Земли (с учетом изменений в скорости подъема шара-зонда сразу после запуска), с тем чтобы обеспечить наилучшую точность измерений ГНСС. Во время взаимного сравнения ВМО высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011) некоторые программные модули интерполяции работали лучше, чем другие, и в самых худших случаях систематические погрешности составляли более 10 м, оставаясь на этом уровне на протяжении всего полета радиозонда данного типа.

Особенно важно проверять высоту локальной антенны ГСОМ относительно датчика давления на поверхности и обеспечивать, чтобы эта величина использовалась корректно в вычислениях, производимых программным обеспечением системы радиозондирования. Следует помнить о том, что расхождение в значениях давления (или погрешность в значении давления) в 1 Па на антенне относительно датчика приземного давления на станции радиозондирования приводит к ошибке 10 м в определении высоты на протяжении всего полета.

Полетная обработка данных должна предусматривать возможности преодоления значительных колебаний (положительных и отрицательных) в скоростях подъема газовой оболочки, поднимающей радиозонд. Погрешности в определении температуры и относительной влажности скажутся только на вычислениях давления на основе геопотенциальной высоты (см. уравнения 12.17 и 12.18). О влиянии погрешностей в измерении температуры на вычисления давления можно судить по величинам погрешностей в значениях высоты, приведенным в таблице 12.9, которые возникают в результате погрешности измерения температуры, составляющей 0,25 К на протяжении всего полета. Такая погрешность в значении температуры приводит к погрешностям в значениях давления 0,4; 0,3; 0,13 и 0,05 гПа при номинальном давлении 300, 100, 30 и 10 гПа, соответственно.

Таким образом в стратосфере геометрические высоты, определенные с помощью ГНСС, являются гораздо более надежными измерениями высоты, чем при помощи любой другой оперативной системы измерения. Вблизи земной поверхности измерения высоты с помощью ГНСС должны проводиться с большой осторожностью, чтобы обеспечить качество, сопоставимое с лучшими датчиками давления. Требования по перспективному значению погрешности для давления, указанные в [приложении 12.А](#), используя радиозонды с ГНСС, можно выполнить для всех значений давления. Вместе с тем, отнюдь не очевидно, что все системы радиозондирования с ГНСС могут обеспечить выполнение требований по оптимальному значению давления на низких уровнях, и при давлении ниже 100 гПа оптимальные требуемые значения могут быть достигнуты при условии, что погрешности в измерении температуры небольшие.

12.5.6.2 *При радиолокационных наблюдениях за высотой*

Влияние погрешностей радиолокационных наблюдений на результаты измерения ветра рассматриваются в настоящей публикации, [глава 13](#). Однако при радиолокационном определении высоты ошибки в угле места (случайные и систематические) являются гораздо более значительными, чем при определении ветра. Систематическое смещение наклонной дальности также более существенно при измерениях высоты, чем при измерениях ветра. Таким образом, радиолокаторы, обеспечивающие удовлетворительные наблюдения за ветром, часто имеют такие погрешности в угле места и наклонной дальности, которые препятствуют получению высококачественных данных измерения высоты (и, следовательно, давления). Наибольшие ошибки наблюдаются при малых углах возвышения радиолокатора — обычно на больших расстояниях в стратосфере.

Небольшие, но значимые систематические погрешности в угле места могут быть обусловлены следующими различными факторами:

- a) перекося осей вращения по азимуту и углу места радиолокатора во время его изготовления. Для того чтобы избежать этого, следует в спецификации на поставку оборудования четко указать, какая требуется точность;
- b) ошибки в горизонтировании радиолокатора при его установке и в установлении нулевого отсчета для угла места в горизонтальной плоскости;
- c) расхождения между электрическими и механическими осями следящих антенн, которые, возможно, возникают при ремонте или замене электрических компонентов радиолокатора.

Погрешности могут возникать вследствие ошибок системы преобразователя, измеряющей угол места радиолокатора по механическому положению следящей антенны.

Систематические погрешности в наклонной дальности могут быть вызваны следующими причинами:

- a) задержкой во включении цепи измерения времени и расстояния или неправильной компенсацией задержки сигнала в радиолокационных электронных средствах сопровождения;
- b) погрешностью в измерении частоты калибратора расстояния.

Таким образом, системы радиозондирования, работающие без датчиков давления и рассчитанные единственно на радиолокационные измерения высоты, требуют частых проверок и регулировок радиолокаторов в процессе обычной эксплуатации станции. Эти системы непригодны для использования в странах, в которых возможности сервисного технического обслуживания ограничены.

12.6 **ОБОРУДОВАНИЕ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ**

12.6.1 **Общие характеристики**

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

- a) антенна и радиоприемник для приема сигналов с радиозонда;
- b) оборудование для декодирования радиозондовых сигналов и для преобразования этих сигналов в метеорологические величины;

- с) оборудование для представления данных метеорологических измерений оператору таким образом, чтобы можно было передавать пользователям необходимые сообщения в соответствии с требованиями.

При необходимости для наблюдений за ветром может дополнительно использоваться и другое оборудование (например, устройство сопряжения с радиолокатором или следящие устройства ГНСС).

Сигналы, выходящие с декодера, должны, как правило, служить в качестве входных сигналов для компьютера для архивации и дальнейшей обработки и коррекции данных.

Современные системы наземных станций могут быть либо приобретены в виде комплексной системы у какого-либо производителя, либо созданы из отдельных модулей, поставленных из различных источников. В случае, когда ремонт и обслуживание будут обеспечиваться в основном самим производителем или его представителями, а не операторами, предпочтительнее выбирать комплексную систему. Систему, состоящую из отдельных модулей, можно гораздо легче адаптировать к различным типам радиозондов. Этого можно достичь, добавляя соответствующие декодеры, без дополнительных затрат на приобретение основных частей комплексной наземной системы, предлагаемых каждым производителем. Модульный тип системы может быть предпочтительным вариантом для операторов, способных самостоятельно обслуживать техническую часть и программное обеспечение, независимо от производителя радиозондов. В последние 10 лет системы из отдельных модулей сталкиваются с проблемами из-за сложности тестирования таких систем, а также с проблемами, возникающими при необходимости адаптации программного обеспечения стандартных поправок производителя к нестандартному использованию с другой системой обработки данных.

Примечание: при существующих темпах развития современных электронных средств для производителей трудно будет обеспечивать надлежащее обслуживание конкретных комплексных систем более 10–15 лет. Таким образом, при планировании долгосрочных расходов необходимо предусмотреть замену комплексных наземных систем примерно каждые 10 лет.

12.6.2 Программное обеспечение для обработки данных

Удовлетворительное программное обеспечение для радиозондовой наземной системы является гораздо более сложным, чем программное обеспечение, необходимое просто для оценки, например, геопотенциальных высот на стандартном уровне на основе точных данных. Данные измерений плохого качества должны отбраковываться; при этом специальные процедуры интерполяции позволяют справляться с работой при отсутствии небольшого количества данных. Существует серьезный риск того, что программист, который недостаточно изучил работу радиозондов, произведет на первый взгляд обоснованные упрощения, которые впоследствии, при определенных обстоятельствах, приведут к возникновению весьма значительных неопределенностей. Например, в том случае, когда прием данных с радиозонда плохой, совершенно неправильно проводить в слишком больших масштабах интерполяцию данных с использованием математических методов; этот способ вполне надежен, когда качество данных в целом хорошее, но становится ненадежным, когда качество данных в целом плохое. Хорошим примером алгоритма, который может перестать быть надежным при плохом качестве сигнала, является коррекция постоянной времени ответной реакции, которая используется некоторыми изготовителями для температуры.

Раньше некоторые проблемы с приемом сигналов и погрешностями измерения давления сразу же после запуска в отдельных случаях компенсировались путем коррекции времени, связанного с получаемыми данными. Это не приводит к возникновению значительных неопределенностей в результатах измерений, однако может сделать почти невозможной проверку работы датчика радиозонда при сравнительных испытаниях радиозондов.

Таким образом, при разработке программного обеспечения в целях общего контроля чрезвычайно важно воспользоваться услугами специалиста или консультанта по радиозондам¹. Для подготовки эффективного программного обеспечения необходимо, чтобы над ним работал высококвалифицированный профессиональный программист. Это программное обеспечение должно охватывать средства отображения и интерактивные средства для оператора, которые требуются для оперативного использования. Программное обеспечение обязательно должно быть устойчивым и не должно отказывать при работе неопытных операторов. В последнее десятилетие для разработки большей части программного обеспечения, предназначенного для коммерческих наземных радиозондовых систем, требовалось, по меньшей мере, два или три года. Программное обеспечение разрабатывалось в сотрудничестве с НМГС, проводившими его тестирование. Это тестирование осуществлялась высококвалифицированными операторами и испытателями до тех пор, пока программное обеспечение не становилось абсолютно надежным в оперативной деятельности. После этого программное обеспечение для наземных систем могло использоваться операторами, не обладающими какими-либо особыми навыками работы с компьютерами.

Программное обеспечение для наземной системы должно быть хорошо задокументировано, и должно включать четкое описание используемых алгоритмов². Вся система в целом должна быть разработана таким образом, чтобы обеспечить возможность для моделирования зондирования с целью проверки и сравнения. Было предложено использовать ряды данных о соответствующих диапазонах давления, температуры и влажности для проверки надежности вновь разрабатываемого программного обеспечения. Именно ошибки, связанные с недостатками программного обеспечения, часто ограничивают точность данных, сообщаемых с радиозондов наилучших типов.

12.7 ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЗОНДОВ

12.7.1 Контрольное внесение корректирующих поправок непосредственно перед использованием

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, точность которых соответствует спецификациям пользователя. 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

¹ Рекомендовано КПМН на двенадцатой сессии (1998 г.) в соответствии с рекомендацией 2 (КПМН-XII).

² См. рекомендацию 2 (КПМН-XII).

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.

В современных системах радиозондирования предпусковые проверки частично или полностью автоматизированы. Для радиозондов предыдущего поколения КПМН рекомендовала следующее³:

- a) функционирование радиозондовых датчиков давления, температуры и относительной влажности должно проверяться в контролируемой среде, такой как лабораторный шкаф для калибровки или устройство предполетной проверки, до запуска радиозонда;
- b) минимально необходимая проверка должна быть по мере возможности автоматизирована, чтобы устранить возможность ошибки оператора;
- c) данные наблюдений за температурой и относительной влажностью также должны быть проверены в сравнении со стандартными данными приземных наблюдений за температурой и относительной влажностью на станции непосредственно перед запуском радиозонда;
- d) точность контрольных датчиков должна быть, по крайней мере, такой же, как у датчиков радиозонда, при этом контрольные датчики должны проходить регулярную калибровку в соответствии с инструкциями производителя.

12.7.2 Методы запуска радиозондов

Радиозонды обычно запускаются с помощью газонаполненной оболочки, поднимающейся со скоростью от 5 до 7 м с⁻¹, в зависимости от спецификации и характеристик используемой оболочки (см. главу 8 тома III настоящего Руководства). Такая скорость подъема позволяет производить измерения своевременно: радиозонду требуется примерно 40 минут, чтобы достичь высоты 16 км, и примерно 90 минут, чтобы достичь высоты более 30 км — таким образом, информация может быть быстро передана в центры прогнозирования. Конструкция и размещение датчиков температуры и относительной влажности на радиозонде предусматривают обычно надлежащую вентиляцию при скорости подъема, равной примерно 6 м с⁻¹. Поправки к данным о температуре, вводимые для устранения погрешностей, связанных с нагревом солнечной радиацией, действительны, как правило, лишь при указанной скорости подъема.

Информация с радиозонда поступает на наземную станцию, которая обычно располагается на фиксированном 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. Радиозонды продолжают передавать данные после разрыва шара, но они обычно отбрасываются. Начиная примерно с 2020 года, некоторые станции обрабатывают и предоставляют профили спуска, а некоторые системы ЧПП используют

³ Рекомендовано КПМН на одиннадцатой сессии (1994 г.) в соответствии с рекомендацией 9 (КПМН-XI).

подмножества этих данных. На верхних уровнях радиозонд может падать очень быстро, даже с парашютом, и это связано со смещением температуры на этих уровнях (Ingleby et al., 2021). Предварительные результаты показывают, что качество данных о спуске сильно варьируется в зависимости от типа радиозонда.

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 $12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, 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, принимаются и обрабатываются на воздушном судне. В течение примерно 15 лет основным используемым был сбрасываемый зонд, описанный Hock and Franklin (1999). Для размещения сбрасываемых радиозондов также используются дистанционно пилотируемые аппараты. Дистанционно пилотируемые воздушные транспортные средства также использовались для развертывания сбрасываемых зондов. Сбрасываемые зонды используются для полевых экспериментов и в случае погодных явлений высокой интенсивности, в частности, тропических циклонов.

12.7.3 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 часто запускают вручную или с использованием вспомогательного устройства для запуска из какого-либо ангара или контейнера. Сложность устройства ангара и процедуры запуска зависят от того, какой газ используется для наполнения шара (см. главу 8 тома III настоящего Руководства), и от скорости и направления приземного ветра в месте запуска. Время от времени на глобальной сети радиозондирования были случаи со смертельным исходом из-за неосторожного обращения с газом водородом. Руководители станций радиозондирования, использующих водород, должны осознавать возможный риск взрыва и должны обеспечить, чтобы все сотрудники были надлежащим образом информированы и обучены обращению с водородом. Исключительно важно, чтобы оборудование для получения водорода содержалось в хорошем состоянии и было правильно организовано его хранение. Неисправное оборудование не должно использоваться. Оборудование для наполнения оболочки должно иметь заземление для предотвращения статического разряда.

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 $0,5\text{—}1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Автоматические системы для запуска радиозондов доступны на коммерческой основе и становятся все более распространенными. 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.

В том случае, когда пользователям требуются точные данные о вертикальной структуре атмосферного пограничного слоя, данные приземных наблюдений, включенные в аэрологическое сообщение, следует получать из пункта, расположенного поблизости от места запуска радиозонда. Место запуска радиозонда также должно быть репрезентативным для условий в пограничном слое, соответствующих наземной синоптической сети в данном районе. Предпочтительно, чтобы оператор (или автоматизированная система) проводили приземные наблюдения сразу же после, а не до запуска шара-зонда. Оператору следует избегать ввода данных приземных наблюдений до запуска шара-зонда, поскольку метеорологические условия могут успеть измениться до запуска в случае, когда происходит значительная задержка запуска (например, из-за разрыва оболочки воздушного шара перед запуском или из-за полетов воздушных судов). Особенно важно обеспечить, чтобы были безошибочными измерения приземного давления, результаты которых вводятся в наземную систему, если измерения давления с помощью системы радиозондирования основаны на ГНСС.

Скорость реагирования радиозондовых датчиков сегодня такова, что кондиционирование радиозонда перед запуском не настолько критично, как в прошлом. Вместе с тем, когда идет дождь, необходимо предусмотреть определенную защиту для датчиков радиозонда до его запуска.

12.7.4 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 нее идет спутная 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 спутной 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 20 м. Однако если радиозонд поднимается на высоту 30 км или выше, то более приемлемой будет подвеска длиной примерно 40 м (см., например, Elms et al., 1994).

Примечание: при исследовании влияния спутной струи за газонаполненной оболочкой на радиозондовые измерения чрезвычайно важно обеспечить правильное размещение используемых с этой целью датчиков на радиозонде. Датчики должны быть размещены таким образом, чтобы воздух, входящий в контакт с другими поверхностями на радиозонде, не мог бы попасть на датчики во время подъема. Возможными источниками загрязнения теплом или водяным паром на радиозонде являются внутренние поверхности защитных шахт, держателей датчиков или внешние поверхности корпуса радиозонда.

12.7.5 Безопасность населения

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 необходимость 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^{-1} и менее. Остатки газонаполненной оболочки после ее разрыва уменьшают скорость спуска на более низких уровнях. Однако при определенных обстоятельствах большая часть оболочки после ее разрыва отделяется от оснастки радиозонда, и если не использовать парашют, то скорость спуска в этом случае будет слишком высокой.

Важно, чтобы радиозонды были экологически безопасными после того, как они упадут на поверхность Земли или в Мировой океан, независимо от того, подберут ли их люди, животные, или они будут оставлены разлагаться. Дополнительные соображения по экологически безопасным радиозондам подробно изложены в [приложении 12.C](#).

12.8 СРАВНЕНИЕ, КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

12.8.1 Сравнения

Общее качество данных оперативных радиозондовых измерений геопотенциальной высоты (и, следовательно, данных измерений температуры, осредненной для слоя большой вертикальной протяженности) контролируется в определенных прогностических центрах путем сравнения со значениями геопотенциальных высот на стандартных изобарических поверхностях по данным краткосрочных (6 или 12 ч) прогнозов, полученных на основе глобальных моделей ЧПП для той же географической точки. Статистические характеристики обобщаются в виде ежемесячных осредненных данных, которые используются для определения как неудовлетворительного качества измерений, так и значительных систематических изменений в характеристиках радиозонда (см. [12.8.1.1](#)).

Статистические данные о точности датчиков относительной влажности также собираются центрами ЧПП, и они тоже сравниваются с данными спутниковых наблюдений.

Рабочие характеристики радиозонда или датчиков радиозонда могут быть исследованы в лаборатории, где имеются оборудованные надлежащим образом испытательные камеры, в которых температура и давление могут регулироваться для имитации условий полета радиозонда.

Подробное изучение рабочих характеристик датчиков температуры, давления и относительной влажности в полете лучше всего проводить при сравнении радиозондов, когда несколько типов радиозондов запускается вместе на одной газонаполненной оболочке. НМГС могут проводить такие проверки в рамках процесса закупок, тестируя один или два новых типа радиозондов в сравнении с более устоявшейся системой (к сожалению, результаты обычно носят коммерческий конфиденциальный характер). ВМО координирует взаимные сравнения радиозондов с более широким кругом оперативных систем. В [приложении 12.D](#) приведены рекомендации по организации взаимосравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний. Характеристики погрешностей этих других радиозондов должны быть уже установлены в ходе проведенных ранее испытаний. Идеальным для проведения сравнительных испытаний радиозондов мог бы стать полигон, где имеется возможность независимым методом измерять высоту, на которой находится радиозонд во время полета. В настоящее время эта задача может быть выполнена путем использования данных измерений от двух различных прошедших испытания радиозондов с ГНСС.

12.8.1.1 **Оценка качества с использованием краткосрочных прогнозов**

В лучших глобальных моделях ЧПП неопределенность в краткосрочных (6 или 12 ч) прогнозах геопотенциальных высот уровня 100 гПа составляет для большинства районов мира от 10 до 20 м. Эти неопределенности соответствуют погрешности измерения средней температуры слоя от поверхности до уровня 100 гПа, равной 0,15—0,3 К. Таким образом, сопоставление с полями прогноза обеспечивает хорошую чувствительность при обнаружении погрешностей зонда при измерении температуры, если погрешности превышают примерно 0,3 К. При таком сравнении в качестве эталона используются прогностические поля вместо полей анализа. Прогностические поля в качестве эталона в меньшей степени подвержены влиянию со стороны систематических погрешностей в значениях геопотенциальной высоты радиозондовых измерений в заданном районе, чем поля метеорологического анализа. Однако для прогностических полей на срок 6 или 12 часов характерны небольшие систематические ошибки, и они не могут рассматриваться в качестве абсолютного эталона. Неопределенность систематической ошибки прогностического поля составляет не менее 10 м на уровне 100 гПа. Систематические различия прогностических данных разных прогностических центров от данных измерений для конкретной аэрологической станции колеблются, как минимум, в этих пределах. Кроме того, систематические ошибки прогностических полей по мере совершенствования прогностических моделей и методов усвоения данных со временем могут изменяться в тех же пределах. Как бы то ни было, сравнения с прогностическими полями в ведущих центрах оперативного мониторинга позволяют четко определить те аэрологические станции и те типы радиозондов, для которых характерны значительные систематические ошибки в радиозондовых сводках. Elms (2003) представил обзор погрешностей радиозонда в глобальной сети для высот до 30 гПа, а соответствующие статистические данные мониторинга до 2017 года можно найти на веб-сайте ВМО по ссылке: <https://community.wmo.int/activity-areas/imop/upper-air-monitoring-statistics>. В настоящее время заменено Системой мониторинга качества данных ИГСНВ: <https://wdqms.wmo.int/>.

12.8.1.2 **Сравнение данных измерений водяного пара и дистанционного зондирования**

Учитывая, что многие станции радиозондирования в настоящее время оснащены совмещенными с ними датчиками водяного пара с ГНСС, а некоторые имеют совмещенные микроволновые радиометры, целесообразно использовать измерения интегрированного содержания водяного пара от этих двух систем для проверки качества радиозондовых измерений содержания водяного пара, особенно на низких уровнях. Сравнение с измерениями на основе ГСОМ было проведено во время последних сравнений радиозондов ВМО (Nash et al., 2006, 2011), когда измерения ГСОМ использовались для количественной оценки расхождений в дневных и ночных радиозондовых измерениях относительной влажности. Более масштабное глобальное исследование было проведено в работе Wang и Zhang (2008). Использование микроволновых радиометров для проверки расхождений в дневное и ночное время описано в работе Turner et al. (2003).

Несмотря на то что идентификация расхождений в дневное и ночное время на основе измерений интегрированного содержания водяного пара является достаточно надежной, это еще не означает, что все расхождения в значениях содержания водяного пара, полученных при помощи радиозондов и методом дистанционного зондирования, обусловлены погрешностями радиозондовых измерений водяного пара, поскольку измерения водяного пара как при помощи ГНСС, так и микроволнового радиометра имеют погрешности, которые не обязательно остаются постоянными со временем.

12.8.1.3 **Сравнения радиозондов**

Сравнения радиозондов позволяют провести независимое сравнение точности датчиков давления, температуры и относительной влажности радиозондов в зависимости от времени. Однако важно, чтобы проект оснастки для радиозондов предусматривал,

чтобы перемещение радиозондов под держателями не слишком отличалось от их перемещения на газонаполненной оболочке, и чтобы в дневное время оснастка (включая оболочку) не приводила к периодическому поступлению более теплого воздуха на некоторые датчики.

Лабораторные испытания следует проводить с помощью средств, которые аналогичны средствам, необходимым для проведения тщательной калибровки радиозондов изготовителем. Эти испытания можно использовать для проверки адекватности калибровки радиозондов, например зависимости калибровки от температуры датчика. В лаборатории сложно смоделировать реальные атмосферные условия, такие как увлажнение или обледенение датчиков, но прогресс был достигнут в области радиационных погрешностей (von Rohden et al., 2022). Сочетание лабораторных исследований и сравнений, проведенных во время реальных запусков радиозондов, предлагает лучший путь продвижения вперед.

Для сравнения данных измерений в процессе подъема радиозондов необходимо, чтобы получение данных от различных систем было как можно более точно синхронизировано, в идеальном варианте до ± 1 с. В последние годы были разработаны пакеты программного обеспечения для проведения сравнений радиозондов под эгидой ВМО. Они позволяют хранить все радиозондовые измерения в базе данных сравнений, и это дает возможность ученым, осуществляющим проект, сравнивать полученные данные сразу после проведения испытательного полета. Важно, чтобы данные изучались очень быстро во время испытания. Тогда можно быстро обнаруживать любую проблему, возникающую из-за процедуры испытания (например, создание радиозондами взаимных помех), или ошибок в работе самих радиозондов, и инициировать проведение надлежащих дополнительных исследований. Программное обеспечение также позволяет подготовить окончательные статистические данные о сравнении радиозондов в такой форме, которая подходит для публикации.

Поскольку воспроизводимость результатов измерений большинства современных радиозондов улучшилась, стало возможным получить полезные данные о систематической погрешности измерений температуры и давления примерно за 10—15 полетов для одного параметра полета (например, в одно и то же время суток). Поскольку неправильно было бы предполагать, что в измерениях в дневное время при любой высоте солнца будут одинаковые систематические погрешности, желательно испытания проводить, по меньшей мере, в ходе 10—15 сравнительных полетов при одной и той же высоте солнца. Точность измерений датчика температуры лучше всего оценивать на основании результатов других испытаний путем сравнений, проводимых в ночное время. Эта оценка должна быть основана на результатах измерений с помощью радиозондов с проволоочными или алюминированными датчиками, а не с датчиками, для которых характерны значительные погрешности в результате теплообмена в ИК-диапазоне. Если можно обеспечить проведение серии сравнительных полетов (чередующихся в дневное и ночное время), то можно использовать метод временных рядов данных об атмосфере для оценки величины расхождений в измерениях температуры в дневное и ночное время.

Как отмечалось ранее, самой масштабной серией сравнений, проведенных в последние годы, являются международные сравнения радиозондов ВМО. Первичные результаты были представлены в работах Nash and Schmidlin (1987); Ivanov et al. (1991); Yagi et al. (1996); Nash et al. (2006, 2011); Balagurov et al. (2006) и da Silveira et al. (2006). Результаты этих испытаний легли в основу информации, представленной в таблицах 12.3, 12.4, 12.5 и 12.8.

Первое международное сравнение радиозондов было проведено в Пайерне (Швейцария) в 1950 г. Средние систематические расхождения в данных измерения давления и температуры (при давлении выше 100 гПа) составляли 4 гПа и 0,7 К при неопределенностях (доверительный интервал в два среднеквадратических отклонения) 14 гПа и 2 К. Эти значения следует сравнить с результатами, полученными с помощью современных систем радиозондирования, которые представлены в таблицах 12.3, 12.4, 12.5 и 12.8. Результаты, полученные в ходе второго сравнения на том же полигоне в 1956 г., показали, что необходимо повышать точность за счет применения к показаниям

температуры радиационной поправки. Погрешности измерения давления и температуры на уровне 50 гПа были довольно значительными для большинства радиозондов и быстро возрастали на более высоких уровнях, особенно в дневное время. В 1973 г. в Траппе, Франция, было проведено региональное сравнение. Это сравнение позволило выявить значительные погрешности калибровки некоторых радиозондов, причем погрешность измерения температуры одним биметаллическим датчиком в результате воздействия излучения достигала 10 К.

12.8.2 Калибровка

Прежде чем приобретать радиозонды в большом количестве, следует выяснить, какие методы калибровки применялись изготовителями. Кроме того, следует проверить адекватность процедур контроля качества, которые обеспечивают сохранение точности измерений при массовом производстве. Покупателям следует иметь в виду, что некоторые указанные уровни погрешностей и неполадки в работе могут быть неизбежны, если они хотят, чтобы цена на радиозонды оставалась приемлемой. Тем не менее, надежные изготовители должны гарантировать, что показатель отказов в работе радиозондов во время полета не будет превышать 1 % или 2 %.

Если радиозондовые датчики не могут производиться крупными партиями с обеспечением необходимых для пользователей воспроизводимости и неопределенности результатов, а также соответствующего уровня достоверности, следует проводить калибровку приборов и датчиков на индивидуальной основе. Даже если датчики могут производиться крупными партиями, отвечая при этом требованиям принятой стандартной проверки точности измерений, необходимо проводить более тщательную проверку случайно выбранных репрезентативных образцов. В процессе калибровки следует, по мере возможности, воспроизводить условия полета в отношении давления и температуры. Калибровка должна, как правило, проводиться при падении давления и понижении температуры. Относительная влажность будет, вероятно, проверяться на отдельном устройстве. Образцовые датчики, используемые во время калибровки, должны сверяться с национальными контрольными приборами и проверяться через надлежащие интервалы времени в поверочных лабораториях. Образцовые приборы должны эффективно работать во всем диапазоне температур, характерных для радиозондовых измерений.

Конструкция устройства для калибровки зависит в значительной степени от того, должен ли радиозонд проходить калибровку в полной сборке как самостоятельная единица или же должны проверяться лишь блок датчиков или отдельные датчики отдельно от передатчика радиозонда. В последнем случае несмотря на то, что для калибровки можно использовать гораздо меньшее по размеру устройство, необходимо самостоятельно исследовать влияние температуры на работу электронной платы и при наличии такового скорректировать его. Средства для калибровки должны адекватным образом охватывать тот диапазон значений давления и температуры, с которым вероятнее всего придется столкнуться при проведении реального зондирования. Кроме того, учитывая типичную скорость подъема радиозондов, рекомендуется провести исследование влияния вентиляции воздуха на калибровку датчика в диапазоне 5—6 м с⁻¹. В камере для калибровки должны поддерживаться условия, остающиеся стабильными при любом желаемом значении с точностью выше $\pm 0,2$ гПа мин⁻¹ для давления, $\pm 0,25$ К мин⁻¹ для температуры и 1 % относительной влажности в минуту. В качестве эталонных термометров рекомендуется использовать ПТС с неопределенностью выше чем 0,05 К. Условия в камере для калибровки должны измеряться с систематическими погрешностями менее $\pm 0,2$ гПа для давления; $\pm 0,1$ К для температуры и ± 1 % относительной влажности. Для определения диапазона изменения температуры в пространстве, в котором находятся подвергаемые калибровке датчики, в камеру для калибровки следует поместить несколько откалиброванных эталонных ПТС. Максимальное отклонение температуры между эталонными термометрами не должно превышать 0,3 К. Необходимо проводить достаточное число измерений, чтобы калибровочные характеристики представляли функции преобразования датчиков. Неопределенность калибровки датчика должна быть представлена для сравнения с неопределенностью измерений, требуемой пользователями. Типичными факторами неопределенности являются

калибровка эталонного термометра, пространственное отклонение температуры камеры, стабильность датчиков температуры при калибровке и подгонка остатков калибровочных кривых. Датчики давления, в которых изменения температуры компенсируются не в полной мере, должны проходить калибровку при нескольких значениях температуры. Таким образом, можно считать преимуществом, если камера калибровки температуры способна одновременно изменять давление воздуха, а также скорость вентиляции воздуха.

Калибровка датчиков влажности проводится, как правило, в отдельном устройстве. Калибровочная камера должна обеспечивать широкий диапазон относительной влажности при различных температурах, которые могут возникнуть при реальных измерениях. Сама калибровочная камера может изменять относительную влажность, как в случае с коммерческими климатическими камерами. К калибровочной камере может быть подключена отдельная система генерации влажности, например, солевые растворы или сатураторы водяного пара. Для регулирования влажности путем смешивания с влажным газом будет полезна дополнительная система генерации сухого газа. Эталонная относительная влажность, используемая для калибровки, должна определяться либо откалиброванным гигрометром с точкой росы, либо системой генерации влажности, прослеживаемой по международному стандарту влажности. Среднеквадратическое отклонение изменения относительной влажности в пространстве, в котором датчики проходят калибровку, не должно превышать 1 %. Неопределенность измерения опорной температуры точки росы в калибровочной камере должна быть лучше 0,3 К. Стабильность опорного значения температуры должна быть в пределах $\pm 0,15$ К мин⁻¹. Неопределенность калибровки датчика влажности должна быть представлена вместе с действительным температурным диапазоном. Типичными факторами неопределенности измерения являются калибровка эталонного ПТС, пространственное отклонение температуры внутри камеры, стабильность калибруемых датчиков влажности, гигрометров точки росы или генераторов влажности, а также подгонка остатков калибровочных кривых.

Альтернативный вариант калибровки датчиков влажности предусматривает использование шахты или камеры, продуваемой смесью воздуха из двух сосудов, в одном из которых воздух увлажняется насыщенным водяным паром, а в другом осушается силикагелем, при этом относительная влажность смеси контролируется вручную при помощи клапана, регулирующего соотношение порций воздуха, поступающего в шахту.

Учитывая важность калибровки типа или партии радиозондов, ВМО настоятельно призывает Членов ВМО проводить проверки на национальном или региональном уровнях отобранных образцов радиозондов в лабораторных условиях, для того чтобы убедиться в правильности калибровки, проведенной изготовителем⁴.

12.8.3 Техническое обслуживание и ремонт

Частота отказов в работе приемных станций, основанных на современной электронике, должна быть низкой при условии обеспечения надежной защиты от ударов молний вблизи антенн. Изготовитель должен предоставить информацию о подходящем комплекте запасных частей для своей системы. Если в наземной системе выходит из строя какой-то модуль, он обычно заменяется запасным модулем, а неисправный возвращается производителю для ремонта.

Требования к техническому обслуживанию и ремонту радиозондовых систем, основанных на радиолокационных измерениях высоты вместо радиозондовых измерений давления, совершенно иные. В этом случае всегда должно обеспечиваться местное обслуживание на всей сети станций с помощью персонала, имеющего хорошую техническую подготовку (как в области механики, так и электрики). Такое обслуживание совершенно необходимо для обеспечения возможностей точно отслеживать радиозонд и во избежание долгосрочного дрейфа систематических погрешностей измерения высоты.

⁴ См. рекомендацию 9 (КПМН-XI), принятую КПМН на ее одиннадцатой сессии в 1994 г.

12.9 ВЫЧИСЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Никаких предписанных стандартных процедур для вычислений на основе данных радиозондовых наблюдений не существует. Основная проблема заключается в выборе уровней или представлении данных измерений с достаточной детализацией для точного и эффективного воспроизведения профилей температуры и влажности (таких как высота температурной инверсии) относительно геопотенциала на основе данных радиозондирования. Руководящие указания на этот счет были приведены в работе Ноорег (1986) и в процедурах кодирования, принятых ВМО в [Наставлении по кодам](#) (ВМО-№ 306), том I.1 (код FM 35 – XI Ext. TEMP). Этот метод отчетности подходил для работы и использования радиозондов в 1970-х годах, но не для сегодняшнего дня. Для выполнения требований ГОСН ([Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО](#) (ВМО-№ 1160)) необходимо, чтобы информация с радиозондов представлялась с высоким вертикальным разрешением с использованием соответствующих кодов BUFR ([Наставление по кодам](#) (ВМО-№ 306), том I.1)).

12.9.1 Процедуры вычислений и представления результатов радиозондовых измерений

В соответствии с требованиями ГОСН необходимо сообщать данные о высоком вертикальном разрешении (100 м). Это делает выделение значимых уровней излишним. Некоторые пользователи по-прежнему находят полезными стандартные уровни давления. Иногда геопотенциальная высота стандартного уровня сообщается вне профиля измерений (т. е. ниже запуска или выше разрыва шара). Такая экстраполяция должна быть сведена к минимуму или полностью прекращена.

В кодовой форме FM 35-XI Ext. TEMP температуры указываются с точностью до 0,2 °C. В коде BUFR температуры указываются в градусах Кельвина с точностью до двух знаков после запятой. Сравнивая эти два метода, Ingleby (2017) обнаружил, что разные системы радиозондирования используют различные методы округления при составлении сводок TEMP. Одна из систем радиозондирования округляла значения в двух десятичных знаках в сторону 0 °C, что давало отклонение 0,05 K, но с разным знаком выше и ниже 0 °C. Одна из систем декодирования имела смещение в 0,1 K.

Использование в современных наземных радиозондовых системах недорогих, но мощных вычислительных систем означает, что для архивации и обработки данных радиозондовых измерений можно использовать более частые измерения, чем при вычислениях вручную. Обработка данных радиозондовых измерений вручную почти всегда ведет к появлению дополнительных ошибок при расчетах аэрологических параметров, поэтому от ручной обработки данных следует отказаться.

С 2023 года ГОСН требует направления данных о высоком вертикальном разрешении (с использованием формата BUFR), поэтому ручной или алгоритмический отбор значимых уровней становится устаревшим. Представление данных о высоком разрешении повышает полезность профилей радиозондов и имеет смысл, учитывая большие объемы финансовых средств, которые ежегодно тратятся на расходные материалы для радиозондов.

12.9.2 Внесение поправок

Из вышеизложенного должно быть ясно, что изменение характеристик датчика радиозонда, обусловленное большим диапазоном характеристик внешних условий при подъеме радиозонда, является слишком значительным, чтобы быть представленным простой калибровкой, проведенной при какой-либо заданной температуре. Современная обработка данных позволяет использовать для калибровки более сложные алгоритмы. Это обеспечивает измерения с меньшей неопределенностью, чем при использовании систем обработки данных вручную. Очень важно, чтобы эти алгоритмы были надлежащим образом задокументированы. Пользователей следует всегда информировать

о значительных улучшениях или изменениях алгоритмов. В архивных регистрационных записях, хранящихся на станциях радиозондирования, должны содержаться сведения об используемых радиозондах и основных алгоритмах, примененных при обработке данных. Серийный номер радиозонда и версию программного обеспечения можно и следует сообщать в сообщениях BUFR.

Всем данным радиозондовых измерений температуры присущи ошибки, связанные с влиянием солнечной радиации. Поэтому рекомендуется при обработке данных всегда применять поправку на воздействие радиации (основанную на ожидаемой точности измерений датчика при обычных условиях), если она известна. Подробные сведения об этой радиационной поправке следует регистрировать и хранить в архиве станции наряду с архивными записями соответствующих первоначальных полученных данных радиозондовых наблюдений, если этого требует национальная практика. В работе Dirksen et al. (2014) представлена комплексная попытка количественной оценки и внесения поправок в данные о радиации и другие погрешности радиозондов.

Особую проблему при внесении поправок представляют ошибки, связанные с теплообменом в ИК-диапазоне, поскольку эти ошибки зависят от температуры атмосферы. Таким образом, предпочтительно как можно скорее отказаться от использования белой краски с высокой излучательной способностью в инфракрасной части спектра в качестве покрытия датчиков вместо того, чтобы разрабатывать очень сложные схемы корректировки погрешностей на теплообмен в ИК-диапазоне.

Аналогичным образом нецелесообразно пытаться откорректировать необычно большие ошибки, связанные с нагреванием под воздействием солнечной радиации, при помощи программного обеспечения, вместо того чтобы устранить дополнительные источники нагревания путем правильного размещения датчика по отношению к его опорам, соединительным проводам и корпусу радиозонда.

Для измерений относительной влажности могут применяться поправки на большую инерционность и дневной разогрев датчика влажности. Что касается температуры, то письменные свидетельства о поправках и изменениях в процедурах внесения поправок должны быть известны пользователю и сохраняться в архиве данных наблюдений на станции, желательно вместе с архивом необработанных данных. Подробное описание этих алгоритмов должно быть известно тем, кто закупает новые системы.

Учитывая важность способов внесения поправок, ВМО⁵ настоятельно призывает Членов:

- a) вносить поправки и предоставлять откорректированные аэрологические данные с различных аэрологических станций Глобальной сети наблюдений;
- b) извещать пользователей данных об изменениях в методологии, которая используется для внесения поправок в сводки, с тем чтобы они могли быть по желанию откорректированы;
- c) сохранять в архивах как откорректированные, так и неоткорректированные данные аэрологических наблюдений, и вести записи поправок, вводимых для климатологических применений; используемый метод должен быть определен на национальном уровне;
- d) информировать ВМО о применяемых методах внесения поправок.

⁵ См. рекомендацию 8 (КПМН-XI), принятую КПМН на ее одиннадцатой сессии в 1994 г.

12.10 ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАКУПКАМИ

12.10.1 Использование и обновление результатов, полученных при взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО

Результаты, полученные при взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО (Nash et al., 2011), были опубликованы и дают представление о том, как обстояли дела в 2010 г. с относительной точностью измерений с использованием различных систем в тропических условиях. Опубликованный отчет содержит оценку эксплуатационных характеристик систем радиозондирования (см. Nash et al., 2011, таблица 12.1). Несмотря на то, что многие системы функционировали успешно, некоторые радиозонды имели недостатки в проводимых ими измерениях, в основном при дневной температуре, а также измерениях ночной относительной влажности при температурах выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности в ночное время в верхней тропосфере при температурах ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Еще одно взаимное сравнение аэрологических приборов ВМО проходит в 2022 году.

В работе Nash (2015) содержатся значения, полученные конкретными радиозондами, которые соответствуют таблицам 12.2—12.10, составленным на основе испытаний в Янцзяне, Китай, и их тоже можно использовать для распознавания систем с небольшими отклонениями и достаточно малой инерционностью, обеспечивающим небольшую погрешность зонда при измерениях влажности. Небольшое и устойчивое отклонение является важным требованием к радиозондовым измерениям для ведения записей климатических данных.

12.10.2 Некоторые вопросы, которые необходимо учитывать при закупках

Первым шагом в процессе закупок должно быть определение того, какого качества радиозонды необходимо использовать в конкретной сети. При этом рекомендуется, чтобы любой используемый радиозонд удовлетворял приведенным в [приложении 12.A](#) требованиям перспективной точности в условиях климата данной страны. Если станция радиозондирования считается важной для климатических записей, то следует рассматривать радиозонд, точность которого близка к оптимальной. В идеале закупки должны проводиться на конкурсной основе. Это может означать сотрудничество с другими странами в аналогичном регионе для приобретения большего количества радиозондов совместно, а также регулярное опробование системы там, где были закуплены радиозонды, например, каждый год или каждые два года. Следует помнить, что системы, которые отличаются друг от друга лишь незначительно по своей точности, при повторных испытаниях могут оказаться в другом порядке относительно друг друга. Поэтому только заметные различия в точности следует воспринимать как значимые, и не следует обращать внимание на небольшие различия в относительной оценке.

Опыт консультаций в ходе региональных учебных семинаров, свидетельствует о том, что есть некоторые вопросы, которые следует учитывать при закупке оборудования:

- a) оборудование должно быть способно устойчиво функционировать на протяжении длительного времени. Другими словами, помимо закупки аппаратного и программного обеспечения должны быть предусмотрены механизмы обеспечения долгосрочной поддержки системы либо изготовителем, либо работниками на местах, либо и теми, и другими;
- b) необходимо убедиться, что наземная антенна достаточно чувствительна для получения сигналов при всех условиях в данном месте, независимо от того, являются ли ветры на высотах очень слабыми или очень сильными. Не нужно пытаться сэкономить деньги, покупая дешевую антенну, которая не будет подходить в некоторых условиях;
- c) следует принять решение в отношении того, будет ли местный персонал обслуживать вторичный радиолокатор или же более подходящей является

полностью автоматизированная система радиозондирования ГНСС. Обратите внимание, что использование радиолокационных данных измерений приведет к большей неопределенности измерений ветра и высоты, чем те, которые получаются с помощью радиозондов ГНСС. Поэтому необходимо также решить, является ли допустимой повышенная неопределенность измерений при выборе радиозондов не ГНСС;

- d) если предстоит закупать систему радиозондирования с ГНСС, проверьте, нет ли в данном районе источника радиочастотных помех, которые могут вызывать проблемы;
 - e) необходимо принять решение, какая требуется точность при измерении высоты, и определить, какие размеры радиозондов и оболочек подходят (если радиозонды не используются при давлении ниже 30 гПа, то существует больший выбор подходящих радиозондов, см. таблицы 12.2—12.5);
 - f) необходимо принять решение, какая требуется точность датчика относительной влажности (к примеру, станция ГРУАН или ГУАН (аэрологическая сеть ГСНК) требует более высокого стандарта, чем обычная станция ГСНК) на основе таблицы 12.1 Nash et al. (2011) и таблиц в приложениях 12.A и 12.B;
 - g) если метеорологические условия часто бывают влажными и облачными, то следует конкретно указать, чтобы радиозондовые датчики имели защиту от влажности и загрязнения и попросить представить свидетельства того, как такая защита работает;
 - h) следует обратиться с просьбой о договоре компенсации, если слишком большое количество радиозондов дают отказы во время полетов;
 - i) необходимо запросить свидетельства, подтверждающие, что изготовитель ранее надежно обеспечивал поставки радиозондов другим пользователям, в тех объемах, которые будут использоваться на станции;
 - j) следует убедиться, что наземное оборудование может производить сообщения, которые делают возможным передачу данных с высоким разрешением. Эти сообщения должны быть подходящими для передачи с использованием средств связи, имеющихся в данном месте, и должны удовлетворять потребности пользователя в данных с хорошим вертикальным разрешением;
 - k) необходимо обеспечить, чтобы компьютеры в составе наземного оборудования были совместимы с местной телекоммуникационной системой (включая интернет связь, если необходимо).
-

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.А. СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРСПЕКТИВНОЙ И ОПТИМАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Примечание: при существующих технологических возможностях согласно оценкам Восьмого международного взаимного сравнения радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай (Nash et al., 2011). Применяются для радиозондовых измерений в области синоптической и климатической метеорологии.

Параметр	Высота (км) (температура (°C), в случае влажности)	Требование к перспективной точности ^{a,b}	Требование к оптимальной неопределенности ^b
Давление	1	3 гПа	2 гПа
	10	3 гПа	1 гПа
	16	2 гПа	0,6 гПа
	24	1 гПа	0,2 гПа
	32	0,4 гПа	0,1 гПа
Температура	от 0 до 16	1 К	0,4 К
	выше 16	2 К	0,8 К
Относительная влажность (только в тропопаузе)	от 0 до 12 (от 40 до -50 °C) ^c	15 % ОВ	6 % ОВ
	от 12 до 17 (от -50 до -90 °C) ^c	30 % ОВ	10 % ОВ
Коэффициент перемешивания нижняя стратосфера (специализированные системы)	от 12 до 25	20 % ppmv ^d	4 % ppmv
Направление ветра	от 0 до 16	10°, скорость < 10 м·с ⁻¹ 4° при больших скоростях	5°, скорость < 10 м·с ⁻¹ 2° при больших скоростях
	выше 16	20°, скорость < 10 м·с ⁻¹ 8° при больших скоростях	5°, скорость < 10 м·с ⁻¹ 2° при больших скоростях
Скорость ветра	от 0 до 16	2 м·с ⁻¹	1 м·с ⁻¹
	выше 16	4 м·с ⁻¹	1 м·с ⁻¹

Параметр	Высота (км) (температура (°C), в случае влажности)	Требование к перспективной точности ^{a,b}	Требование к оптимальной неопределенности ^b
Компоненты ветра	от 0 до 16	2 м·с ⁻¹	1 м·с ⁻¹
	выше 16	3 м·с ⁻¹	1 м·с ⁻¹
Геопотенциальная высота на уровне особых точек	1	30 гп. м	20 гп. м
	5	40 гп. м	20 гп. м
	10	60 гп. м	20 гп. м
	16	120 гп. м	40 гп. м
	20	200 гп. м	40 гп. м
	32	240 гп. м	60 гп. м

Примечания:

^a Значения получены для основных целевых применений радиозондов.

^b Выражается как расширенная погрешность ($k = 2$), которая охватывает приблизительно 95 % варьирования результатов в условиях зондирования, включая все существенные источники погрешности (например, динамические и радиационные условия).

^c Изменение ожидаемой точности датчика относительной влажности лучше согласуется с температурой, чем с высотой в тропосфере.

^d рртв = частей на миллион по объему.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.В. ОЦЕНКИ ЦЕЛЕВОЙ, ПЕРСПЕКТИВНОЙ И ПОРОГОВОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫСОТАХ, ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ (НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНОГО ОБЗОРА ПОТРЕБНОСТЕЙ ВМО В АЭРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ)

- a) *Целевая точность* — оптимальное требуемое значение, выше которого дальнейшее улучшение не требуется.
- b) *Перспективная точность* — промежуточный уровень между *пороговой* и *целевой точностью*, достижение которого приведет к значительному улучшению в целевом применении. Промежуточный уровень можно считать оптимальным требованием с точки зрения соотношения затрат и результатов при планировании или проектировании систем наблюдения.
- c) *Пороговая точность* — минимальное требование, которое должно быть выполнено для того, чтобы данные были полезными;

Рекомендуется считать затраты на радиозонды оправданными, если достигнутые неопределенность измерений и вертикальное разрешение соответствуют пороговым значениям или лучше их и максимально близки к целевым значениям, насколько это приемлемо по затратам.

Информация в этих таблицах взята в основном из ОСКАР/Потребности (см. <https://space.oscar.wmo.int/observingrequirements>) для глобальных и высокого разрешения ЧПП и климата. Это неопределенности 1σ ($k=1$). В свою очередь, климатические требования исходят от ГСНК (ГСНК-200). Планетарный пограничный слой ниже обозначается в сокращенном виде как ППС, а верхняя тропосфера/нижняя стратосфера как ВТ/НС.

Таблица 12.В.1. Перечень предельных значений, принятых ГСНК/ВМО для неопределенности (векторная погрешность СКО, $k = 1$) и вертикального разрешения для измерений ветра на высотах

Слой		Целевая точность для ЧПП	Целевая точность для климата	Перспективная точность для ЧПП	Пороговая точность для ЧПП
ППС	Неопределенность	$1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
ППС	Вертикальное разрешение	100—200 м	500 м	250 м	400 м
Свободная тропосфера	Неопределенность	$1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Свободная тропосфера	Вертикальное разрешение	500 м	500 м	700 м	1 км
ВТ/НС	Неопределенность	$1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
ВТ/НС	Вертикальное разрешение	500 м	500 м	1 км	3 км
Верхняя стратосфера	Неопределенность	$1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Верхняя стратосфера	Вертикальное разрешение	1 км	500 м	2 км	3 км
Долгосрочная устойчивость		$0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в течение 10 лет			

Таблица 12.В.2. Перечень принятых ГСНК/ВМО предельных значений неопределенности и вертикального разрешения ($k = 1$) для измерения температуры на высотах (примечание: эти предельные значения относятся к температуре на конкретной высоте и могут быть другими, когда температуры интегрируются по относительно мощным слоям, например, см. таблицу 12.В.4 в отношении перспективной точности на основе требований к определению геопотенциальной высоты поверхности 100 гПа)

<i>Слой</i>		<i>Целевая точность для ЧПП</i>	<i>Целевая точность для климата</i>	<i>Перспективная точность для ЧПП</i>	<i>Пороговая точность для ЧПП</i>
ППС	Неопределенность	0,5 К	0,5 К	1 К	3 К
ППС	Вертикальное разрешение	100 — 300 м	1 км	250 м	1 км
Свободная тропосфера	Неопределенность	0,5 К	0,5 К	1 К	3 К
Свободная тропосфера	Вертикальное разрешение	300 м	1 км	500 м	1 км
ВТ/НС	Неопределенность	0,5 К	0,5 К	1 К	3 К
ВТ/НС	Вертикальное разрешение	300 м	2 км	1 км	3 км
Верхняя стратосфера	Неопределенность	0,5 К	0,2 К	3 К	5 К
Верхняя стратосфера	Вертикальное разрешение	1 км	5 км	1 км	3 км
Долгосрочная устойчивость			0,05 К в течение 10 лет		

Таблица 12.В.3. Перечень предельных значений ($k=1$), принятых ГСНК/ВМО для аэрологических измерений влажности приборами

Слой		Целевая точность для ЧПП	Целевая точность для климата	Перспективная точность для ЧПП	Пороговая точность для ЧПП
Нижняя тропосфера	Неопределенность	2 % ОВ	5 % ОВ	5 % ОВ	10 % ОВ
Нижняя тропосфера	Вертикальное разрешение	100—300 м	2 км	200 м	1 км
Верхняя тропосфера	Неопределенность	2 % ОВ	5 % ОВ	5 % ОВ	10 % ОВ
Верхняя тропосфера	Вертикальное разрешение	300 м	2 км	500 м	1 км
ВТ/НС	Неопределенность	не установлена	5 % ОВ	не установлена	не установлена
ВТ/НС	Вертикальное разрешение	не установлена	2 км	не установлена	не установлена
Долгосрочная устойчивость			0,3 % в течение 10 лет		

Примечание: требования ОСКАР/Потребности и ГСНК относятся к удельной влажности, однако это приводит к слишком строгим предельным значениям в слоях, в которых относительная влажность слишком низкая в нижней и средней тропосфере. Поэтому значения приводятся в виде приблизительно эквивалентной относительной влажности, а коэффициент перемешивания следует использовать при очень низких температурах или в стратосфере.

Таблица 12.В.4. Перечень предельных значений для неопределенности ($k = 2$) и вертикального разрешения для геопотенциальной высоты поверхности 100 гПа и уровней особых точек в соответствии с предельными значениями, принятыми ГСНК/ВМО для измерений температуры на высотах

<i>Слой</i>		<i>Целевая точность для ЧПП</i>	<i>Целевая точность для климата</i>	<i>Перспективная точность для ЧПП</i>
Поверхность до 100 гПа	Неопределенность	24 гп. м (= 0,4 К температуры слоя)	12 гп. м (= 0,2 К температуры слоя)	50 гп. м (= 0,8 К температуры слоя)
Нижняя тропосфера	Неопределенность измерения температуры ^а	40 гп. м	16 гп. м в среднем	120 гп. м
	Неопределенность для нижней границы облака ^б	30 гп. м		
Верхняя тропосфера	Неопределенность измерения температуры ^а	40 гп. м	14 гп. м в среднем	120 гп. м
Нижняя стратосфера, экваториальная зона	Неопределенность измерения температуры ^а	70 гп. м	48 гп. М	200 гп. м
Нижняя стратосфера, внетропические районы	Неопределенность измерения температуры ^а	100 гп. м	68 гп. М	300 гп. м
Верхняя стратосфера	Неопределенность измерения температуры ^а	80 гп. м	60 гп. М	240 гп. м
Долгосрочная устойчивость			4—8 гп. м в течение 10 лет	

Примечания:

^а Предельное значение для ошибки определения высоты дает типичную ошибку определения температуры, равную половине значения, указанного в таблице 12.В.2 для предельных значений температуры.

^б Предельное значение, установленное для обеспечения соответствия с измерениями при помощи оперативных лазерных облакомеров в нижней тропосфере.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.С. БЕЗОПАСНЫЕ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ РАДИОЗОНДЫ

Ежегодно во всем мире запускается около 620 000 радиозондов. После запуска радиозонд поднимается в атмосферу до тех пор, пока оболочка шар-зонда не разрывается, и радиозонд падает на землю. Все радиозонды вместе с фрагментами оболочки и контейнерами с аппаратурой падают на землю или в океан и, таким образом, загрязняют окружающую среду.

Переносимые на шарах-зондах отработанные средства радиозондирования способны достигать весьма удаленных районов и часто являются единственным источником отходов человеческой деятельности в замкнутых местностях, незатронутых деятельностью человека, природных заповедниках и других экологически уязвимых районах.

Радиозонды, оснащенные подвеской с контейнерами и аппаратурой, представляют особую экологическую проблему. Часто переносимые ими средства радиозондирования застревают в деревьях, на линиях электропередач и конструкциях башенного типа или плавают в океанских водах, возможно, оставаясь там в течение многих лет. Их подвески с аппаратурой представляют собой долгосрочную угрозу для дикой природы на суше и в океанах.

Основная трудность в производстве безопасных для окружающей среды радиозондов заключается в определении материалов, которые одновременно отвечают функциональным требованиям и обладают способностью к разложению окружающей средой. Большинство современных частей радиозондов изготавливаются из не поддающихся разложению окружающей средой материалов. Существуют разлагаемые окружающей средой пластмассы, но в настоящее время только один производитель радиозондов продемонстрировал подвеску радиозонда, изготовленную из таких материалов. Другим производителям рекомендуется использовать биоразлагаемый пластик или иные подходящие материалы для радиозондов.

Радиозонды различаются по размеру и весу. По мере того как более крупные и тяжелые радиозонды опускаются, они представляют собой угрозу для людей и животных. Современные технологии позволяют изготавливать радиозонды меньшего размера и более легкие — около 100 г. Баллон, возможно, на 350 г или 600 г, тяжелее. Всем производителям рекомендуется уменьшить размеры и вес их радиозондов при сохранении функциональности. Преимущество более легких радиозондов состоит в том, что можно использовать оболочку шар-зонда меньшего размера, поэтому требуется меньше газа. Уменьшенный размер оболочки шар-зонда также означает меньшее количество загрязняющих веществ.

Системы крепления подвески со средствами радиозондирования часто изготавливаются из не поддающихся разложению окружающей средой кордов, такого как нейлон, который может сохраняться в окружающей среде десятилетиями. Рекомендуется заменить материал для корда радиозонда на разлагаемые окружающей средой канатно-верёвочные изделия, такие как хлопчатобумажный шпагат или полипропилен без защиты от ультрафиолета. Это снизит риск запутывания обитателей дикой природы в океанах и на суше и приведет к более быстрому высвобождению подвески со средствами радиозондирования, застрявших в деревьях, линиях электропередач и других сооружениях.

Оболочки шар-зонда из синтетического латекса имеют гораздо более медленную скорость разложения, чем латекс из натурального каучука, поэтому предпочтительнее использовать последний.

Радиозондовые батареи всех типов, например, щелочные, литиевые и активируемые водой батареи, содержат токсичные и агрессивные химические вещества. В настоящее время не существует экологически чистых батарей, однако литиевые батареи оказывают

меньшее воздействие. Поскольку производители снижают энергопотребление радиозондов, это позволит использовать батареи меньшего размера и еще больше сократить общий объем загрязняющих веществ.

Операторы и производители радиозондов должны поощрять сбор и возврат или утилизацию радиозондов в соответствии с местными нормативами обращения с электронными и химическими отходами. Оболочку и подвеску радиозонда следует утилизировать как обычные отходы. Обработка на местах сводит к минимуму любое дополнительное воздействие на окружающую среду, связанное с транспортировкой использованных корда и подвески радиозонда. Использованные литиевые батареи требуют особого обращения и не допускаются к перевозке воздушным транспортом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.D. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ И УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Примечание: на основе Сокращенного окончательного отчета с резолюциями и рекомендациями двенадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений (ВМО-№ 881), дополнение II, и последующих обновлений.

ЧАСТЬ I — РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ

1. Введение

1.1 Настоящие рекомендации исходят из того, что процедуры, которые применяются различными центрами испытаний, соответствуют процедурам, принятым другими национальными и международными организациями. При этом также предполагается, что Организационный комитет будет сформирован из участников (Членов), заинтересованных в проведении сравнений радиозондов, и что, по крайней мере, один из членов комитета не будет представлять ни одного из участников испытаний для того, чтобы обеспечивать руководство проведением сравнений радиозондов. Привлечение такого независимого от участия в испытаниях члена комитета является важным для того, чтобы избежать предвзятости при планировании сравнений. Необходимо также обязательно предусмотреть либо активное участие в сравнениях сотрудников производителей радиозондов, либо проведение подготовки и запуска таких радиозондов независимым оперативным персоналом организации, принимающей у себя в стране сравнения радиозондов.

1.2 Все сравнения различаются между собой до определенной степени, поэтому настоящие рекомендации должны толковаться только в качестве обобщенного перечня задач, которые необходимо выполнить. Если потребуются, Организационному комитету следует вносить изменения, но не в ущерб достоверности результатов и научной оценки испытаний.

1.3 Итоговые отчеты проводившихся ранее сравнений и отчеты организационных совещаний других организационных комитетов могут быть использованы в качестве примера методов проведения сравнений. Секретариат ВМО должен сохранять эти предыдущие отчеты и обеспечивать доступ к ним.

2. Цели сравнений

2.1 Цели сравнений должны быть ясно сформулированы, содержать перечень ожидаемых результатов сравнений и определять, каким образом будут распространяться полученные результаты. Перед Организационным комитетом стоит задача рассмотреть ожидаемые результаты сравнений радиозондов, заранее выявить и предугадать любые потенциальные проблемы. Роль Организационного комитета заключается в обеспечении руководства, но он также обязан вырабатывать ясные и подробные формулировки основных целей, а также критерии для оценки полученных результатов. Организационный комитет должен также определять, как наилучшим образом обеспечить успешное проведение сравнений путем использования имеющихся фундаментальных знаний и накопленного опыта проведения сравнений.

3. Место, время и продолжительность проведения сравнений

3.1 Принимающая организация должна предоставить Организационному комитету и участникам описание предложенного места и условий (местоположение и др.) проведения сравнений, характеристик окружающей среды, климатологических

параметров и рельефа местности. Принимающая организация должна также сообщить имя руководителя или администратора проекта, который будет отвечать за оперативную деятельность во время проведения сравнений и выступать в роли контактного лица для оказания необходимого содействия.

3.2 Организационный комитет должен посетить предложенный центр проведения сравнений, чтобы выяснить, соответствуют ли задачам его технические возможности и, если это необходимо, предложить внести изменения. После того как Организационный комитет признает адекватность предложенного центра и его возможностей, руководитель проекта должен подготовить описание места и окружающей его среды для распространения среди участников сравнений. Руководитель проекта, знакомый с графиком работы принимающей организации, должен определить дату начала сравнений и их продолжительность. Копия этого графика должна быть предоставлена Организационному комитету.

3.3 Помимо даты начала сравнений руководитель проекта должен предложить дату, когда его полигон проведения испытаний будет предоставлен для установки оборудования участников, и организовать подключение к системе сбора данных. Необходимо предусмотреть выделение времени всем участникам для проверки и тестирования оборудования до начала сравнений, а также предоставить им дополнительное время для того, чтобы операторы ознакомились с действующим порядком выполнения работ на полигоне.

4. **Участие в сравнениях**

4.1 В соответствии с требованиями руководитель проекта и/или Организационный комитет должны пригласить через Генерального секретаря ВМО страны-члены принять участие в сравнениях. Однако, как только участники определены, руководитель проекта должен взять на себя все последующие шаги по взаимодействию с участниками.

4.2 Руководитель проекта должен составить подробный вопросник, который рассылается Генеральным секретарем ВМО всем участникам с целью получения информации о каждом типе приборов, предложенных для сравнений. Предполагается, что участники предоставят информацию о необходимых размерах помещения для оборудования, средствах связи, особых требованиях к подключению аппаратуры и характеристиках программного обеспечения. Они также должны предоставить соответствующую документацию с описанием своего наземного и подвешенного к газонаполненной оболочке контрольно-измерительного оборудования.

4.3 Важно, чтобы участники предоставили информацию о методике калибровки своих радиозондов, отвечающей стандартам образцовых средств измерений. Хотя и ожидается, что в сравнениях будут участвовать оперативные радиозонды, это не всегда обязательно; новые или исследовательские типы радиозондов могут быть допущены к участию в испытаниях по согласованию со всеми участниками сравнений, руководителем проекта и Организационным комитетом.

5. **Обязательства**

5.1 **Участники**

5.1.1 Участники отвечают за перевозку своего оборудования и расходы, связанные с такой перевозкой.

5.1.2 Участники устанавливают и демонтируют свое собственное оборудование по согласованию с руководителем проекта. Принимающая организация в случае необходимости оказывает помощь в распаковке и упаковке оборудования.

5.1.3 Участники обеспечивают свои системы всем необходимым вспомогательным оборудованием, крепежными приспособлениями для наземного оборудования, сигнальными и силовыми кабелями, запасными частями и расходными материалами. Участники обеспечивают доступ (если возникает необходимость в оказании помощи со стороны принимающей организации) к подробным инструкциям и руководствам, необходимым для установки, эксплуатации и обслуживания оборудования, а также, в случае необходимости, калибровки.

5.1.4 Участники подписывают соглашение о протоколе передачи данных в рамках проводимого сравнения.

5.2 **Организация, принимающая у себя сравнения**

5.2.1 Принимающая организация при необходимости оказывает помощь участникам в распаковке и установке оборудования и предоставляет возможности для хранения необходимого имущества, такого как расходные материалы, запасные части и техническая документация.

5.2.2 Принимающая организация, при необходимости, предоставляет вспомогательное оборудование, если такое имеется у нее.

5.2.3 Принимающая организация, при необходимости, оказывает помощь участникам в подключении к оборудованию принимающей организации для сбора данных.

5.2.4 Принимающая сторона гарантирует надлежащее соблюдение всех правовых обязательств, связанных с проведением аэрологических измерений (например, авиационные правила и правила использования радиочастот страны проведения сравнений).

5.2.5 Принимающая организация может предоставлять информацию по таким вопросам, как размещение участников, местный транспорт и повседневная логистическая поддержка, но она не обязана финансировать покрытие расходов, связанных с размещением персонала.

6. **Регламент проведения сравнений**

6.1. Руководитель проекта осуществляет контроль за всеми испытаниями и ведет регистрацию каждой связки радиозондов наряду со всей соответствующей информацией о радиозондах, находящихся в полете, а также метеорологических условий.

6.2 Замены оборудования или программного обеспечения разрешаются по согласованию с руководителем проекта. Необходимо уведомить об этом других участников. Руководитель проекта заполняет журнал, содержащий записи обо всем оборудовании, задействованном в проведении сравнений, и обо всех произведенных заменах.

6.3 Разрешается проведение незначительных ремонтных работ (например, замена предохранителя и др.), не оказывающих влияние на точность измерений аппаратуры. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких незначительных ремонтных работах, о чем делается соответствующая запись в журнале.

6.4 Проверка настройки и обслуживание оборудования участниками испытаний, требующие привлечения специалистов или специального оборудования, разрешаются после уведомления об этом руководителя проекта.

6.5 Любая проблема, которая ставит под угрозу полученные результаты сравнений или работу любого оборудования, должна быть рассмотрена руководителем проекта.

7. Сбор данных

7.1 Организационный комитет должен согласовать соответствующие процедуры сбора данных, таких как частота проведения измерений, интервалы между измерениями, осреднение данных, предварительная обработка данных (может быть ограничена в силу функциональных возможностей отдельных участников), форматы данных, оперативный контроль качества, контроль качества полученных результатов и статистическая отчетность.

7.2 Действующий на начальном этапе Международный организационный комитет принимает решение относительно оборудования и программного обеспечения для сбора данных во время испытания. Все это должно быть тщательно протестировано перед началом сравнений.

7.3 Задержка по времени между проведением наблюдений и предоставлением данных руководителю проекта устанавливается руководителем проекта по согласованию с участниками. Задержка в один час после окончания наблюдений (разрыв оболочки) считается приемлемой.

7.4 Ответственность за уточняющие данные перед проведением анализа, последующий контроль качества данных и за предоставление итоговых данных остается за руководителем проекта.

7.5 Руководитель проекта принимает решение о выборе носителя информации для хранения данных, принимая во внимание возможности принимающей организации, но применяемые носители информации для предоставления участникам итоговых данных могут различаться в зависимости от компьютерных возможностей каждого участника испытаний. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких требованиях.

7.6 Руководитель проекта отвечает за предоставление итоговых данных всем участникам, поэтому принимающая организация должна быть в состоянии получить все индивидуальные файлы данных от каждого участника.

8. Обработка и анализ данных

8.1 Анализ данных

8.1.1 Основные принципы анализа данных должны быть рассмотрены и одобрены заблаговременно до начала проведения сравнений. Эти основные принципы следует включить в программу испытаний в качестве ее составной части.

8.1.2 Между участниками должно быть достигнуто согласие в отношении метода преобразования данных, алгоритмов калибровки и внесения поправок, терминов и сокращенных наименований, постоянных величин и исчерпывающего описания предложенных методов статистического анализа. Принципиально важно, чтобы обработка данных осуществлялась опытными специалистами, назначенными ВМО.

8.1.3 Организационный комитет должен проверять пригодность применения выбранных процедур проведения анализа.

8.1.4 Результаты сравнений должны быть изучены Организационным комитетом, который рассматривает содержание окончательного отчета и приведенные в нем рекомендации.

8.2 **Обработка данных и доступность базы данных**

8.2.1 Все существенные метеорологические данные и данные об окружающей среде должны храниться в базе данных для дальнейшего использования и анализа участниками. Руководитель проекта осуществляет контроль за этими данными.

8.2.2 После окончания сравнений руководитель проекта предоставляет каждому участнику полный комплект данных всех участников сравнений.

9. **Окончательный отчет о проведении сравнений**

9.1 Руководитель проекта готовит проект окончательного отчета, который предоставляется Организационному комитету и участникам сравнений для комментариев и дополнений. Необходимо оговорить временной период для получения ответа.

9.2 Комментарии и дополнения должны быть направлены руководителю проекта и в копии в Организационный комитет.

9.3 После внесения дополнений в проект окончательного отчета он должен быть представлен на рассмотрение Организационного комитета, который может пожелать собраться для его обсуждения, если это необходимо, или может одобрить этот окончательный документ.

9.4 После утверждения Организационным комитетом окончательного документа для его публикации, он направляется в Секретариат для публикации и распространения ВМО.

9.5 Воспроизведение для коммерческих целей любых графиков или таблиц из окончательного отчета не разрешается без специального разрешения ВМО.

10. **Заключительные примечания**

10.1 Организационный комитет может согласиться с тем, что промежуточные результаты могут быть предоставлены только руководителем проекта, и что участники могут представлять ограниченные данные на технических конференциях, за исключением их собственных данных, полученных в ходе испытаний, которые могут быть использованы ими без ограничений. Как только Секретариат ВМО включит в график публикацию окончательного отчета, ВМО обеспечивает доступ к этим данным всем Членам, которые попросят об этом. После этого Члены имеют право анализировать эти данные и представлять результаты на совещаниях и в публикациях.

ЧАСТЬ II — РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. **Введение**

1.1 Для поддержания долгосрочной стабильности глобальной системы аэрологических наблюдений важно сохранять возможность проведения количественных сравнений радиозондов. Существующие и новые оперативные системы радиозондирования должны на регулярной основе подвергаться проверке с использованием контрольных приборов во время полетов. Члены должны обеспечивать сохранение минимального числа центров проведения испытаний с необходимой инфраструктурой для проведения сравнительных испытаний радиозондов.

1.2 Опыт проведения после 1984 г. серии сравнений радиозондов ВМО показывает, что необходимо иметь ряд центров для того, чтобы проводить сравнения радиозондов при разнообразных полетных условиях.

1.3 Работа датчика относительной влажности особенно зависит от условий во время испытаний, например, количества облачности и дождевых осадков во время подъема радиозонда, или от того, высокая или низкая влажность у поверхности.

1.4 Погрешности в измерении температуры в дневное время зависят от солнечного альбедо и тем самым от альбедо поверхности и облачного покрова. Таким образом, погрешности в определении температуры в прибрежных и континентальных районах могут значительно различаться. Погрешности, обусловленные влиянием ИК-излучения на датчик температуры, будут зависеть не только от состояния подстилающей поверхности и распределения облачности, но и от температуры атмосферы. Поэтому погрешности в определении температуры в результате влияния инфракрасного излучения в тропиках (например, вблизи тропопаузы) будут совершенно другими по сравнению с погрешностями в средних широтах.

1.5 Погрешности при наблюдениях за ветром на высотах с помощью многих аэрологических систем зависят от удаленности радиозонда от места его запуска (а также угла наклона траектории полета радиозонда). Поэтому сравнения должны проводиться в условиях как слабого, так и сильного ветра на высотах.

2. Требования к материально-технической базе центра

2.1 Центр, подходящий для проведения испытаний, должен иметь достаточно зданий/помещений для обеспечения работы, как минимум, четырех различных систем.

2.2 Центр должен обеспечивать возможности для измерения с хорошим качеством приземной температуры, относительной влажности, давления и ветра вблизи площадок для запуска радиозондов. Возможность проведения дополнительных образцовых измерений температур, давления и относительной влажности давала бы преимущество такому центру.

2.3 Центр проведения испытаний должен иметь средства для обеспечения прямых измерений геопотенциальной высоты во время испытательных полетов (возможно с использованием радиозонда с ГСОМ, позволяющей определять высоту с высокой точностью).

2.4 Центр проведения испытаний должен иметь успешно функционирующий наземный датчик с ГСОМ для измерения интегрального содержания водяного пара или наземные радиометры и интерферометры.

2.5 В центре проведения испытаний желательно иметь системы наблюдений за облаками, такие как лазерный высотомер для измерения нижней границы облачности, и радиолокаторы, определяющие характеристики облачности.

2.6 Лидар для измерений аэрозолей и лидар для измерения относительной влажности, могут также оказаться полезными в центре проведения испытаний.

2.7 Центр проведения испытаний должен быть одобрен национальными органами по контролю за воздушным пространством для запусков больших газонаполненных оболочек (вес оболочки 3 000 гр) с полезной грузоподъемностью до 5 кг. Ангарты для наполнения оболочек должны позволять запускать такие большие оболочки.

3. Предлагаемые географические регионы для испытаний

3.1 Для того чтобы способствовать проведению испытаний основными производителями радиозондов целесообразно сохранять или создать центры для испытаний в средних широтах в Северной Америке, Европе и Азии. В идеале каждый из этих регионов должен иметь, как минимум, два центра, один с прибрежными (морскими) условиями и другой внутри континента.

3.2 Кроме того, целесообразно определить минимум два центра в тропиках, особенно для испытаний датчиков относительной влажности.

3.3 Если упомянутые выше главные центры проведения испытаний не обеспечивают адекватные экстремальные условия для испытания датчиков относительной влажности (например, условия с очень низкой влажностью на малых высотах), может возникнуть необходимость выбрать дополнительные центры проведения испытаний в засушливых районах или там, где приземные температуры воздуха очень низкие (ниже -30°C зимой). Возможно, некоторые из них могут быть выбраны из уже функционирующих центров ГРУАН.

ЧАСТЬ III — РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

1. Введение

1.1 Крупные сравнения радиозондов ВМО организуются приблизительно каждые 5–6 лет, то есть, когда большая группа изготовителей может извлечь пользу из крупномасштабного испытания систем, которые уже прошли прототипные испытания. Для новых проектов или тех изготовителей, которые работают над устранением проблем, выявленных во время сравнений радиозондов ВМО, необходимо проводить менее масштабные и более дешевые испытания.

1.2 Возможно для изготовителей, пытающихся продемонстрировать, что проблема была устранена, лучше всего проводить испытания на одном из испытательных полигонов КПМН, специально выделенных для этих целей.

2. Рекомендуемая процедура

2.1 Испытания для подтверждения того, что проблемы были устранены, должны проводиться с использованием стандартов и методов, аналогичных тем, которые используются в сравнениях радиозондов ВМО. Для этого требуется, чтобы на испытательном полигоне работал персонал, который хорошо знаком с процедурами и методами сравнений радиозондов ВМО, а также необходимо использовать два типа радиозондов, качество работы которых хорошо известно, в качестве рабочих стандартов/радиозондов связи с результатами сравнений радиозондов ВМО.

2.2 Для испытаний опытного образца очень важно сравнивать результаты измерений, полученных в совместном полете радиозондов под одной газонаполненной оболочкой. В идеале радиозонды следует подвешивать таким образом, чтобы они могли свободно вращаться в полете, поскольку именно это происходит во время отдельных подъемов. Радиочастотные характеристики нового радиозонда должны быть достаточно хорошими с тем, чтобы не происходило дрейфа частоты и не создавались помехи для радиозонда, с которым проводится сравнение. Сравнение результатов должно проводиться в зависимости от времени от начала полета, поскольку неразумно полагать, что определение высоты/давления при измерениях температуры и относительной влажности характеризуется пренебрежимо малой погрешностью. Число

испытательных полетов вначале может быть достаточно небольшим, поскольку некоторые первоначальные погрешности зачастую бывают большими и могут быть выявлены достаточно быстро.

2.3 Если стоит задача улучшить новую конструкцию радиозонда таким образом, чтобы качество его измерений приблизилось к высококачественным радиозондам, испытанным во взаимных сравнениях высококачественных систем радиозондирования ВМО, тогда будет необходимо использовать один из радиозондов более высокого качества в качестве испытательного эталона. Всегда следует выполнять инструкции изготовителя при подготовке радиозондов к испытательным полетам. Испытания должны проводиться в дневное и ночное время, поскольку требуется выявить погрешности радиозонда для дневных температур, вместе с тем в ночное время погрешности измерения относительной влажности часто бывают хуже, чем в дневное время.

2.4 Окончательные испытания опытного образца необходимо проводить в такое время года, когда колебания относительной влажности по вертикали и со временем являются большими на всех уровнях в тропосфере.

3. **Архивирование результатов**

3.1 Результаты испытаний в центрах проведения испытаний КПМН должны быть направлены в соответствующую группу экспертов КПМН для проверки и размещения на веб-сайтах КПМН.

3.2 После того, как новая национальная разработка полностью отработана, желательно также в дальнейшем направлять результаты сравнительных испытаний в соответствующую группу экспертов КПМН.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Balagurov, A.; Kats, A.; Krestyannikova, N. et al. *WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison* (WMO/TD-No. 1305). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 85; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2006.
- da Silveira, R. B.; Fisch, G. F.; Machado, L. A. T. et al. *WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Alcântara (Brazil), 20 May–10 June 2001* (WMO/TD-No. 1314). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 90. World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2006.
- Dirksen, R. J.; Sommer, M.; Immler, F. J. et al. Reference Quality Upper-air Measurements: GRUAN Data Processing for the Vaisala RS92 Radiosonde. *Atmos Meas Tech* **2014**, 7, 4463–4490. <https://doi.org/10.5194/amt-7-4463-2014>.
- Elms, J. *WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members in 2002 and Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements for Period from 1998 to 2001* (WMO/TD-No. 1197). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 80; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2003.
- Elms, J. B.; Nash, J.; Williams, G. The Difference in Observed Temperatures from Radiosondes Suspended 10 m and 40 m Beneath a 1400 g Balloon. Presented at the *WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)*, Geneva, 28 February–2 March 1994. In *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94)* (WMO/TD-No. 588). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 57; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1994.
- Eyre, J. R. Observation Bias Correction Schemes in Data Assimilation Systems: A Theoretical Study of Some of Their Properties. *Q J R Meteorol Soc* **2016**, 142, 2284–2291. <https://doi.org/10.1002/qj.2819>.
- Eyre, J. R.; Bell, W.; Cotton, J. et al. Assimilation of Satellite Data in Numerical Weather Prediction. Part II: Recent Years. *Q J R Meteorol Soc* **2022**, 148, 521–556. <https://doi.org/10.1002/qj.4228>.
- Fujiwara, M.; Shiotani, M.; Hasebe, F. et al. Performance of the Meteorolabor “Snow White” Chilled-mirror Hygrometer in the Tropical Troposphere: Comparisons with the Vaisala RS80 A/H-Humicap Sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2003**, 20, 1534–1542. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1534:POTMSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1534:POTMSW>2.0.CO;2).
- Gaffen, D. J. *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (WMO/TD-No. 541). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 50; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1993.
- Global Climate Observing System (GCOS). *The Global Observing System for Climate: Implementation Needs*. (GCOS-200); World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2016.
- Hawson, C. L. *Performance Requirements of Aerological Instruments: An Assessment Based on Atmospheric Variability* (WMO-No. 267). Technical Note No. 112; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1970.
- Ho, S.-P.; Peng, L.; Vömel, H. Characterization of the Long-term Radiosonde Temperature Biases in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere Using COSMIC and Metop-A/GRAS Data from 2006 to 2014. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2017**, 17, 4493–4511. <https://doi.org/10.5194/acp-17-4493-2017>.
- Hock, T. F.; Franklin, J. L. The NCAR GPS Dropwindsonde. *Bull Amer Meteor Soc* **2017**, 80, 407–420. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0407:TNGD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0407:TNGD>2.0.CO;2).
- Hooper, A. H. *Upper-air Sounding Studies* (WMO-No. 394), Volume I. Technical Note No. 140; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1975.
- Hooper, A. H. *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (WMO/TD-No. 175). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 21; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1986.
- Hyland, R. W.; Wexler, A. Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K. *ASHRAE Transactions* **1983**, 89(2A) 500–519.
- Ingleby, B. *An Assessment of Different Radiosonde Types 2015/2016*. Unpublished ECMWF Technical Memorandum (ECMWF Technical Memorandum No. 807), 2017.
- Ingleby, B.; Motl, M.; Marlton, G. et al. On the Quality of RS41 Radiosonde Descent Data, *Atmos Meas Tech Discuss* **2021** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/amt-2021-183>.
- Ivanov, A.; Kats, A.; Kurnosenko, S. et al. *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (WMO/TD-No. 451). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 40; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1991.

- Jensen, M. P.; Holdridge, D. J.; Survo, P. et al. Comparison of Vaisala Radiosondes RS41 and RS92 at the ARM Southern Great Plains Site, *Atmos Meas Tech* **2016**, 9, 3115–3129. <https://doi.org/10.5194/amt-9-3115-2016>.
- Kitchen, M. Representativeness Errors for Radiosonde Observations. *Q J R Meteorol Soc* **1989**, 115, 673–700. <https://doi.org/10.1002/qj.49711548713>.
- Lee, S.-W.; Choi, B. I.; Woo S.-B. et al. Calibration of a Radiosonde Humidity Sensor at Low Temperature and Low Pressure. *Metrologia* **2019**, 56:055008. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab336f>.
- Lee, S.-W.; Kim, S.; Lee, Y.-S. et al. Radiation Correction and Uncertainty Evaluation of RS41 Temperature Sensors by Using an Upper-air Simulator. *Atmos Meas Tech* **2022a**, 15, 1107–1121. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1107-2022>.
- Lee, S.-W.; Kim, S.; Lee, Y.-S. et al. Laboratory Characterisations and Intercomparison Sounding Test of Dual Thermistor Radiosondes for Radiation Correction. *Atmos Meas Tech Discuss* **2022b** [preprint]. <https://doi.org/10.5194/amt-2021-343>.
- List, R. J. *Smithsonian Meteorological Tables*; Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1968.
- Luers, J. K.; Eskridge, R. E. Use of Radiosonde Temperature Data in Climate Studies. *Journal of Climate* **1998**, 11, 1002–1019. <https://www.jstor.org/stable/26242973>.
- Miloshevich, L. M.; Paukkunen, A.; Vömel H. et al. Development and Validation of a Time-lag Correction for Vaisala Radiosonde Humidity Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2004**, 21, 1305–1327. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<1305:DAVOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1305:DAVOAT>2.0.CO;2).
- Moradi, I.; Soden, B.; Ferraro, R. et al. Assessing the Quality of Humidity Measurements from Global Operational Radiosonde Sensors, *J Geophys Res Atmos* **2013**, 118, 8040–8053. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50589>.
- Nash, J. *Measurement of Upper-air Pressure, Temperature and Humidity*. Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 121. World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2015.
- Nash, J.; Elms, J. B.; Oakley, T. J. Relative Humidity Sensor Performance Observed in Recent International Radiosonde Comparisons. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, 27–31 March 1995, 43–48.
- Nash, J.; Oakley, T.; Vömel, H. et al. *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems – Yangjiang, China, 12 July–3 August 2010* (WMO/TD-No. 1580). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 107; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2011.
- Nash, J.; Schmidlin, F. J. *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (WMO/TD-No. 195). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 30; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1987.
- Nash, J.; Smout, R.; Oakley, T. et al. *WMO Intercomparison of Radiosonde Systems – Vacoas, Mauritius, 2–25 February 2005* (WMO/TD-No. 1303). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 83; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2005.
- Newman, S.; Carminati, F.; Lawrence, H. et al. Assessment of New Satellite Missions within the Framework of Numerical Weather Prediction. *Remote Sensing* **2020**, 12, 1580. <https://doi.org/10.3390/rs12101580>.
- Paukkunen, A. Sensor Heating to Enhance Reliability of Radiosonde Humidity Measurement. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, 27–31 March 1995, 65–69.
- Philipona, R.; Kräuchi, A.; Romanens, G. et al. Solar and Thermal Radiation Errors on Upper-air Radiosonde Temperature Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2013**, 30, 2382–2393. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00047.1>.
- Ruston, B.; Bowler, N.; Healy S. et al. GNSS-RO Sounding in the Troposphere and Stratosphere. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications, Volume IV*; Park, S. K.; Xu, L., Eds. Springer, 2022; 373–395. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-77722-7>.
- Schmidlin, F. Recent Application of the Accurate Temperature Measuring (ATM) Radiosonde. Presented at the *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006)*, Geneva, 4–6 December 2006. In *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006)* (WMO/TD-No. 1354). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 94; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2006.
- Schmidlin, F. J.; Sang Lee, H.; Ranganayakamma, B. Deriving the Accuracy of Different Radiosonde Types Using the Three-thermistor Radiosonde Technique. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, 27–31 March 1995, 27–31.

- Shimizu, K.; Hasebe, F. Fast-response High-resolution Temperature Sonde Aimed at Contamination-free Profile Observations. *Atmospheric Measurement Techniques* **2010**, 3, 1673–1681. <https://doi.org/10.5194/amt-3-1673-2010>.
- Smees, M.; Nash, J. et al. A New Operational Radiosonde for the UK: Procurement Testing at Camborne Met Office, September–October 2009 [Poster]. Presented at the *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2010)*, Helsinki, 30 August–1 September 2010. In *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2010)* (WMO/TD-No. 1546). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 104; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 2010.
- Sonntag, D. Advancements in the Field of Hygrometry. *Meteorologische Zeitschrift* **1994**, 3(2), 51–66. <https://doi.org/10.1127/metz/3/1994/51>.
- Sun B.; Calbet, X.; Reale, A. et al. Accuracy of Vaisala RS41 and RS92 Upper Tropospheric Humidity Compared to Satellite Hyperspectral Infrared Measurements. *Remote Sensing* **2021** 13(2), 173. <https://doi.org/10.3390/rs13020173>.
- Turner, D. D.; Lesht, B. M.; Clough, S. A. et al. Dry Bias and Variability in Vaisala RS80-H Radiosondes: The ARM Experience. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2003**, 20, 117–132. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<0117:DBAVIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<0117:DBAVIV>2.0.CO;2).
- Turtiainen, H.; Tammela, S.; Stuns, I. A New Radiosonde Temperature Sensor with Fast Response Time and Small Radiation Error. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, 27–31 March 1995, 60–64.
- Vömel, H.; David D. E.; Smith, K. Accuracy of Tropospheric and Stratospheric Water Vapor Measurements by the Cryogenic Frost Point Hygrometer: Instrumental Details and Observations. *Journal of Geophysical Research* **2007**, 112, D08305. <https://doi.org/10.1029/2006JD007224>.
- von Rohden, C.; Sommer, M.; Naebert, T. et al. Laboratory Characterisation of the Radiation Temperature Error of Radiosondes and its Application to the GRUAN Data Processing for the Vaisala RS41, *Atmos Meas Tech* **2022**, 15, 383–405. <https://doi.org/10.5194/amt-15-383-2022>.
- Wade, C. G. Calibration and Data Reduction Problems Affecting National Weather Service Radiosonde Humidity Measurements. In *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, 27–31 March 1995, 37–42.
- Wang, J.; Zhang, L. Systematic Errors in Global Radiosonde Precipitable Water Data from Comparisons with Ground-based GPS Measurements. *Journal of Climate* **2008**, 21, 2218–2238. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1944.1>.
- Wang, J.; Zhang, L.; Dai, A. et al. Radiation Dry Bias Correction of Vaisala RS92 Humidity Data and its Impacts on Historical Radiosonde Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2013**, 30, 197–214. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00113.1>.
- Wexler, A. Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 to 100 °C. A Revision. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry* **1976**, 80A(5 and 6), 775–785. <https://doi.org/10.6028%2Fjres.080A.071>.
- Wexler, A. Vapor Pressure Formulation for Ice. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry* **1977**, 81A(1), 5–20. <https://doi.org/10.6028%2Fjres.081A.003>.
- World Meteorological Organization (WMO). *International Meteorological Vocabulary* (WMO-No. 182). Geneva, 1992.
- World Meteorological Organization (WMO). *GRUAN Implementation Plan 2009–2013* (WMO/TD-No. 1506). GCOS-134. Geneva, 2009.
- World Meteorological Organization (WMO). *Manual on Codes* (WMO-No. 306), Volume I.1. Geneva, 2019.
- World Meteorological Organization (WMO). *Technical Regulations* (WMO-No. 49), Volume I. Geneva, 2019.
- World Meteorological Organization (WMO). *Manual on the WMO Integrated Global Observing System* (WMO-No. 1160). Geneva, 2021.
- Yagi, S.; Mita, A.; Inoue, N. *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV, Tsukuba, Japan, 15 February–12 March 1993: Final Report* (WMO/TD-No. 742). Instruments and Observing Methods (IOM) Report No. 59; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, 1996.