

ГЛАВА 13. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

13.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

13.1.1 Определения

Нижеследующие определения взяты из *Наставления по Глобальной системе наблюдений* (ВМО, 2010):

Шаропилотное наблюдение. Определение ветра на высотах путем прослеживания при помощи оптического прибора траектории свободного полета шара-пилота.

Радиоветровое наблюдение. Определение ветра на высотах путем прослеживания траектории свободного полета шара-пилота при помощи электронных средств.

Радиоветровое зондирование. Сочетание радиозондовых и радиоветровых наблюдений.

Аэрологическое наблюдение. Метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямо или косвенно.

Наблюдение за ветром на высотах. Наблюдение на данной высоте или результаты завершенного зондирования направления и скорости ветра в атмосфере.

В этой главе рассматриваются, в первую очередь, радиоветровые и шаропилотные наблюдения. Методы использования шаров-зондов, а также измерения с использованием специальных платформ, специализированного оборудования или произведенные косвенным образом с помощью методов дистанционного зондирования, рассматриваются в различных главах тома III настоящего Руководства. В настоящее время большое количество наблюдений получают с коммерческих воздушных судов, а также с помощью профилометров ветра и метеорологических радиолокаторов. Данные шаров-зондов собираются, главным образом, посредством использования методов радиоветрового зондирования, хотя в тех случаях, когда требуются дополнительные данные о ветре на высотах без больших затрат на запуск радиозонда, можно использовать шаропилотные и радиоветровые наблюдения.

13.1.2 Единицы измерения ветра на высотах

Скорость ветра на высотах обычно измеряется в метрах в секунду или в узлах, но может измеряться и в километрах в час. Направление, откуда приходит воздушный поток, измеряется в градусах от севера: 90° соответствует ветру с востока, 180° — с юга, 270° — с запада и 0/360° — с севера. В сводках TEMP направление ветра округляется до ближайших 5°. Измерение с таким разрешением понижает точность, которую можно достичь с помощью самых современных систем, особенно при сильном ветре на высотах. Данные этих систем, кодируемые в коде BUFR, обеспечивают более точную информацию о направлении и скорости ветра на высотах.

В пределах широты 1° от Северного или Южного полюса в сводках о приземном ветре используется направление, при котором ноль азимутного круга совпадает с 0° по Гринвичскому меридиану. Такая система координат должна использоваться на всех стационарных и мобильных аэрологических станциях, расположенных в пределах 1° от Северного или Южного полюса, для направления ветра на всех уровнях полного зондирования, даже если шар движется далеко за пределы широты 1° от полюса. В коде сообщения при этом должно быть указано, что в данной аэрологической сводке используется другая система координат, в частности, если кодирование осуществляется в традиционных буквенно-цифровых кодах. Местоположение станции в коде BUFR автоматически указывает на использование другой системы координат.

Высота, указываемая при сообщении данных измерений радиовеетрового наблюдения/зондирования, является геопотенциальной высотой, так что измерения ветра производятся на тех же высотах, что и радиозондовые измерения температуры и относительной влажности (см. настоящий том, глава 12, 12.3.6). Геопотенциальная высота, преобразованная из геометрической высоты, измеренной радиозондом ГСОМ или радиолокатором, является функцией гравитационного поля в данном месте и не зависит от профилей температуры и ветра. Гравитационная потенциальная энергия единицы массы (Φ) — это интеграл нормальной силы тяжести от высоты СУМ ($z_{\text{geometric}} = 0$) по высоте, на которой расположена масса ($z_{\text{geometric}} = Z$), как описано в уравнении 13.1.

$$\Phi = \int_0^Z \gamma(z_{\text{geometric}}, \varphi) dz_{\text{geometric}} \quad (13.1)$$

где $\gamma(z_{\text{geometric}}, \varphi)$ — нормальная сила тяжести над геоидом. Это функция геометрической высоты $z_{\text{geometric}}$ и геодезической широты φ .

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

$$z(z_{\text{geometric}}, \varphi) = \Phi(z_{\text{geometric}}, \varphi) / \gamma_{45^\circ} = \left(\int_0^Z \gamma(z_{\text{geometric}}, \varphi) dz_{\text{geometric}} \right) / \gamma_{45^\circ} \quad (13.2)$$

где γ_{45° — по определению равна $9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Таким образом, единицей высоты является стандартный геопотенциальный метр. В тропосфере значение геопотенциальной высоты является хорошим приближением к высоте, выраженной в метрах (см., например, настоящий том, глава 12, таблица 12.4). Значения геопотенциальной высоты, используемые в сводках, содержащих данные о ветре на высотах, отсчитываются от уровня моря, хотя во многих системах расчеты геопотенциальной высоты первоначально выполняются применительно к высоте над уровнем станции.

Метод преобразования геометрической высоты в геопотенциальную более подробно описан в настоящем томе, глава 12, где приводятся соответствующие выражения, описывающие зависимость гравитационного поля от высоты и широты.

13.1.3 Метеорологические требования

13.1.3.1 Области применения в метеорологической практике

Наблюдения за ветром на высотах имеют большое значение для глобального оперативного прогнозирования погоды в любом масштабе и часто наиболее эффективны при проведении параллельно с одновременными измерениями полей характеристик воздушных масс (температуры и относительной влажности):

- а) в пограничном слое значения ветра на высотах, обеспечивающие надежные измерения вертикального сдвига ветра, существенны для прогнозирования загрязнения окружающей среды;
- б) они чрезвычайно важны для обеспечения безопасности и экономичности полетов воздушных судов;
- в) точные измерения ветра на высотах, а также измерения вертикального сдвига ветра критически важны при запуске космических аппаратов и других типов ракет;
- г) погрешности данных о ветре на высотах ограничивают точность современной артиллерии, и поэтому эти данные важны с точки зрения безопасности при проведении военных операций;
- д) скорость ветра на высотах является одной из важнейших климатических переменных.

13.1.3.2 *Усовершенствование процедур передачи сообщений*

В численных прогнозах погоды обычно используются значения ветра на высотах, усредненные по слоям; при этом толщина слоев зависит от масштабов прогнозируемых атмосферных движений. Эти значения не всегда используются при стандартных уровнях по давлению или высоте; обычно эти значения относятся к барометрическим высотам, которые изменяются по мере изменения давления у поверхности Земли в месте наблюдения. Таким образом, исключительно важно, чтобы изменения ветра между стандартными уровнями были с хорошей точностью представлены в сводках, содержащих значения ветра на высотах. Это внесет дополнительный вклад в повышение точности значений ветра, передаваемых для стандартных уровней.

В современных системах радиоветрового зондирования имеется возможность при помощи компьютеров без задержки передавать данные обо всех деталях вертикальной структуры, представляющих интерес для метеорологической деятельности и научных исследований. Сводки о ветре на высотах должны содержать достаточно информации, для того чтобы определить вертикальный сдвиг ветра на границе слоев с различными характеристиками воздушных масс. Например, данные о сдвиге ветра через инверсии температуры или о значительном сдвиге ветра, связанном с существенными изменениями относительной влажности с высотой, следует сообщать во всех случаях, когда это возможно.

Когда данные о ветре на высотах сообщаются с использованием кода FM 35-XI Ext. TEMP или FM 32-XI Ext. PILOT (ВМО, 2011a), значения скорости ветра могут отклоняться до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ от линейной интерполяции между значимыми уровнями. Использование автоматизированных алгоритмов с таким установленным пределом отклонения может вызывать ошибки при передаче сообщений, которые будут значительно превышать ошибки наблюдений. Иногда процедура кодирования может также привести к уменьшению точности до такой степени, что не будут удовлетворяться требования к точности, изложенные в настоящем томе, глава 12.

Это должно быть предотвращено в максимально короткие сроки путем представления сводок с использованием соответствующего кода BUFR, позволяющего сообщать данные о вертикальном профиле ветра с высоким разрешением в дополнение к значимым уровням в целях удовлетворения потребностей пользователей. Однако пока это не будет достигнуто, установленный предел отклонения для скорости ветра, равный $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ вместо $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, можно принять в качестве национальной практики для сообщений TEMP и PILOT. Сужение установленного предела должно привести в среднем приблизительно к одному сообщению, содержащему данные о ветре на значимом уровне на километр по вертикали. Сводки TEMP или PILOT должны быть визуально сверены с результатами детализированных измерений ветра на высотах, и передаваемые сообщения должны быть отредактированы, с тем чтобы избежать недопустимых ошибок перед их выпуском.

В прежние годы значения ветра на высотах обычно обрабатывались вручную или с использованием небольшого вычислительного устройства, и было нецелесообразно выпускать подробные сводки о вертикальной структуре поля ветра — отсюда использование значимых уровней и довольно приблизительный установленный предел отклонения, не соответствующий качеству наблюдений, проводимых при помощи современных систем радиоветрового зондирования.

13.1.3.3 *Требования к точности*

Требования к точности измерений ветра на высотах представлены применительно к скорости и направлению ветра, а также ортогональным составляющим ветра, в настоящем томе, глава 12, приложение 12.A. Большинство систем измерения ветра на высотах должны позволять проводить измерения ветра в диапазоне от 0 до $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Для систем, предназначенных для измерения ветра на нижних уровнях, такой широкий диапазон необязателен. Систематические ошибки измерения направления ветра должны быть по возможности минимальными — определенно значительно меньшими 5 %, особенно

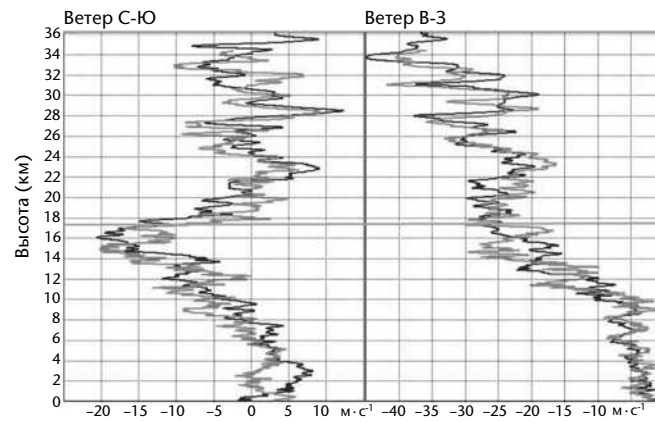
в тех районах, где на высотах, как правило, наблюдаются сильные ветры. В 1990-е годы большинство оперативных систем с хорошими эксплуатационными характеристиками обеспечивали предоставление данных о ветре на высотах со среднеквадратической векторной ошибкой (2σ), равной $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и более в нижней тропосфере, и $5\text{--}6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в верхней тропосфере и стратосфере (Nash, 1994). Появление очень надежных систем обнаружения ветра ГСОМ означает, что многие современные системы способны обеспечить еще более высокую точность со среднеквадратической векторной ошибкой ($k = 2$) менее $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и незначительным уменьшением точности измерений по вертикали (см. результаты проведенного под эгидой ВМО в Янцзяне, Китай, взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов (WMO, 2011b)).

Примеры вертикальных профилей горизонтального ветра, полученных в Янцзяне, Китай, и Соединенном Королевстве, показаны на рисунке 13.1. Эти измерения проводились с вертикальным разрешением выше 150 м. На рисунке 13.1(a) показаны результаты двух измерений, проведенных в Янцзяне с интервалом в 6 часов. Тонкая структура по вертикали не является результатом шума, а отражает истинную структуру атмосферы, полученную также при измерении другими системами радиовеетрового зондирования во время соответствующих запусков. В ходе этого испытания наблюдались очень сильные восточные ветры в верхних слоях стратосферы (связанные с восточной фазой квазидвухлетнего колебания). Более сильные северные ветры, связанные со струйным течением на высоте около 16 км, наблюдались до высоты примерно 21 км и, соответственно, выше тропопаузы на высоте 17,5 км. Детали структуры поля ветра в стратосфере на высоте между 22 и 34 км в целом сохранялись в течение более 7 часов, указывая на постоянный характер большинства деталей структуры поля ветра и, в силу этого, необходимость их архивирования и передачи сообщений о них.

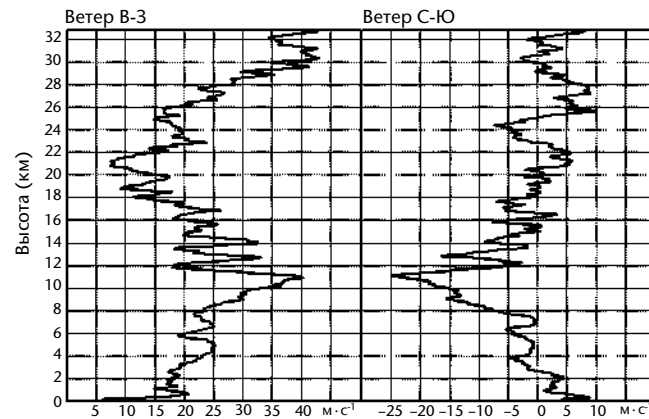
На рисунке 13.1(b) показаны результаты измерений, полученные в начале зимы в Соединенном Королевстве, когда тропопауза находилась намного ниже, на высоте примерно 11 км, однако и здесь сильный ветер, связанный со струйным течением в верхней тропосфере, наблюдается до высоты, как минимум, 16 км. Сильные возмущения в профиле ветра, вызванные гравитационными волнами непосредственно над тропопаузой, не будут представлены при вертикальном разрешении 1 км. В данном случае существует еще одно струйное течение, связанное с циркуляцией вокруг околполярного вихря на высоте примерно 30 км. На рисунке 13.1(c) показаны результаты измерений, полученные в Соединенном Королевстве в летний период. В этом случае наблюдается значительный сдвиг ветра в тропопаузе. Восточные ветры преобладают в стратосфере на высоте больше примерно 16 км, и они не превышают по интенсивности западные ветры в зимний период. Однако между высотами 20 и 32 км вновь наблюдаются значительные возмущения в профиле ветра в летний период.

Таким образом, хотя потребности пользователей в данных о вертикальном разрешении при измерении ветра на высотах, определенные в части I, глава 12, приложение 12.B, таблица 12.B.1, составляют 200–500 м в тропосфере и 1 км в стратосфере, на практике существует информация радиовеетрового зондирования, которая должна архивироваться и передаваться для нужд, отличных от анализа ЧПП. Поэтому рекомендуется проводить измерения с максимально возможным в настоящее время разрешением, при этом вертикальное разрешение должно быть выше или равно 200 м в нижней тропосфере и выше 300 м в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Как можно видеть, вблизи максимальных значений интенсивности струйного течения существуют сильные сдвиги ветра, для надежного представления которых требуется вертикальное разрешение выше 500 м, как определено в таблице 12.B.1.

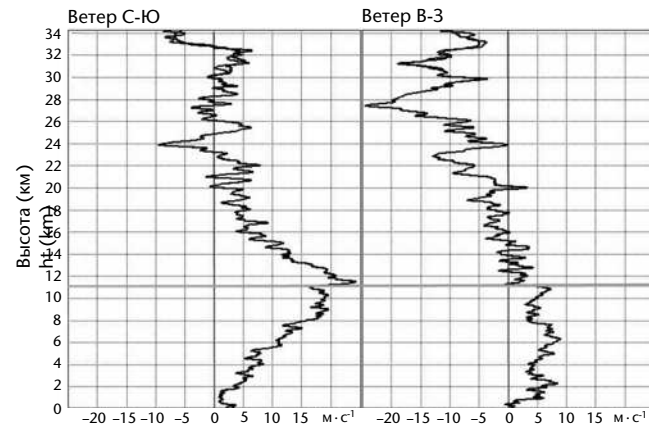
Вертикальное разрешение от 50 до 150 м может оказаться полезным для метеорологических применений общего характера в пограничном слое атмосферы (до высоты 2 км над поверхностью). Однако используемая система слежения должна обеспечивать поддержание приемлемой точности измерения ветра при более высоком вертикальном разрешении, если увеличение разрешения представляется целесообразным.



а) Полет 1 в 08:00 (черный цвет) и полет 3 в 14:48 (серый цвет) 14 июля 2010 г. по данным взаимного сравнения ВМО систем высококачественных радиозондов в Янцзяне, Китай



б) Измерения, сделанные в ноябре в Камборне, Соединенное Королевство; данные двух различных радиозондов наложены друг на друга. (Примечание: на данной вставке изменены местами зональный и меридиональный компоненты ветра, т. е. зональный компонент изображен слева)



с) Измерения, сделанные в июле в Камборне, Соединенное Королевство; данные двух различных радиозондов наложены друг на друга

Рисунок 13.1. Примеры вертикальных профилей горизонтального ветра, полученные с вертикальным разрешением примерно 150 м в Янцзяне, Китай, и в начале зимы и летом в Соединенном Королевстве. Серой горизонтальной линией показана высота тропопаузы.

Очень высокая точность измерения ветра на высотах часто устанавливается при проведении операций на полигонах, таких как запуск ракет. В этом случае должны использоваться специальные шары-зонды с отражающей поверхностью, которые следуют за ветром более точно, чем стандартные метеорологические шары-зонды. Программы наблюдений, которые должны удовлетворять требованиям очень высокой точности, следует тщательно планировать, поскольку наблюдения необходимо проводить близко к требуемому месту и в пределах установленных временных рамок. Можно привести следующие характеристики атмосферной изменчивости. Среднеквадратическая разность векторов между двумя безошибочными наблюдениями ветра на высотах на одной и той же высоте (при вертикальном разрешении, равном 300 м), как правило, составляет менее $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, если измерения производятся одновременно и на расстоянии менее 5 км по горизонтали. Это верно также в том случае, когда измерения производятся в одном и том же месте, но разделены по времени интервалом менее, чем в десять минут (получено по аналогичным исследованиям, более подробным, чем исследования репрезентативности Китчена (Kitchen, 1989)).

13.1.3.4 **Требования к максимальной высоте**

Измерения ветра с помощью аппаратуры, установленной на шаре-зонде, рассматриваемые в данной главе, могут потребоваться на высотах до 35 км и выше в ряде пунктов, особенно в тех, которые входят в ГСНК. Для того чтобы достичь этих высот, могут понадобиться более дорогие шары-зонды, чем более дешевые небольшие шары-зонды, поднимающие системы радиоветрового зондирования на высоты 20–25 км.

Идеальная сеть наблюдения за ветром на высотах должна адекватно отражать движение воздушных масс любого масштаба — от планетарного до мезомасштаба, в тропосфере и нижней стратосфере. На станциях наблюдательной сети также определяются значимые мелкомасштабные ветровые структуры с помощью систем дистанционного зондирования с высоким временным разрешением. Однако в средней и верхней стратосфере для решения метеорологических задач интерес представляют, прежде всего, более крупномасштабные движения воздушных масс, главным образом планетарного масштаба и более крупного синоптического масштаба. Таким образом, на всех пунктах аэрологических наблюдений национальной сети с распределением станций, оптимальным для проведения наблюдений в тропосфере, необязательно проводить измерения на высотах более 25 км. Общие оперативные расходы могут быть ниже, если использовать сочетание наблюдательных систем, описанных в этой главе, с системами зондирования, описанными в томе III настоящего Руководства. В этом случае национальная техническая инфраструктура должна позволять обеспечивать адекватную эксплуатацию различных задействованных систем.

13.1.4 **Методы измерений**

Данные о ветре на высотах, получаемые с помощью систем, установленных на шаре-зонде, собираются, главным образом, посредством использования методов радиоветрового зондирования, хотя в тех случаях, когда требуются дополнительные данные о ветре на высотах без больших затрат на запуск радиозонда, можно использовать наблюдения с помощью шаров-пилотов и радиоветровые наблюдения. Наблюдения, производимые на аэрологических станциях Глобальной системы наблюдений, дополняются над сушей измерениями с самолетов, с помощью измерителей профиля ветра, а также доплеровских метеорологических радиолокаторов. В районах, где совершается большое количество полетов воздушных судов, информация, получаемая с воздушных судов и радаров, преобладает над информацией, получаемой при помощи радиозондов, до высоты 12 км. Над морем данные о ветре на высотах производятся, прежде всего, с гражданских воздушных судов, пролетающих на крейсерской высоте. Они дополняются вертикальными профилями, получаемыми с радиоветровых зондов, запускаемых с судов или удаленных островов, а также в результате слежения за облачностью или структурами полей водяного пара, наблюдаемыми с геостационарных метеорологических спутников. В будущем ожидается, что измерения ветра с помощью установленных на спутниках лидаров и

радиолокаторов улучшат глобальный охват существующих систем наблюдений. При измерении ветра с высоким временным разрешением для конкретных применений используются также содары (радиолокаторы звукового обнаружения и определения дальности), лидары и змейковые анемометры. Для применения в метеорологических целях разрабатывается экономичная технология использования беспилотных воздушных судов.

Выбор метода радиовеетрового зондирования для измерения скорости и направления ветра на высотах обычно зависит от наблюдений, получаемых либо в результате перемещения запущенного свободного шара-зонда при более или менее одинаковой скорости подъема, либо при падении под действием силы тяжести объектов, таких как зонды, сбрасываемые с парашютом. В случае если нужно измерить горизонтальное перемещение воздушной массы, отслеживаемая мишень не должна существенно перемещаться по горизонтали относительно наблюдаемой воздушной массы. Основная информация, которая требуется от систем непосредственного слежения, включает высоту мишени и данные о ее планируемой траектории или в качестве альтернативы ее горизонтальной скорости в известные временные интервалы. Требования к точности, изложенные в настоящем томе, глава 12, приложение 12.А, включают влияние ошибок определения высоты или давления при измерении ветра. Маловероятно, чтобы общие оперативные требования к точности могли выполняться для уровней, расположенных выше пограничного слоя атмосферы, при использовании какого-либо метода слежения, который должен скорее предполагать скорость подъема шара-зонда, чем использовать данные о высоте, полученные с помощью системы слежения или с помощью радиозонда, связанного с мишенью.

Системы дистанционного зондирования позволяют измерять перемещение атмосферных масс в результате рассеяния электромагнитного излучения (ЭМИ) или звука с одной или нескольких мишеней: гидрометеоров, пыли, аэрозоля или неоднородностей индекса рефракции, обусловленных мелкомасштабной атмосферной турбулентностью или самими молекулами воздуха.

В методах прямого обнаружения ветра, рассматриваемых в этой главе, используются мишени, положение которых может непрерывно отслеживаться. Хотя существует много методов, с помощью которых может производиться слежение за мишенями, здесь будут рассмотрены только два наиболее широко используемых.

13.1.4.1 ***Слежение с использованием радионавигационных сигналов***

Радиозонд, способный получать сигналы от системы навигационных радиопередатчиков, прикрепляется к мишени (либо к поднимающемуся шару-зонду, либо к парашюту сбрасываемого зонда). В наиболее часто применяемых системах используются сигналы с навигационных спутников. На практике это означает, что в настоящее время используются сигналы ГСOM со спутника НАВСТАР, однако в будущем могут использоваться и другие недавно введенные в действие спутниковые радионавигационные службы. Сигналы со спутников поступают на специальную антенну радиозонда. В систему также должна входить антенна ГСOM для приема образцовых сигналов, расположенная на земной поверхности. Устройство ГСOM, расположенное либо на земле, либо на радиозонде, декодирует сигналы или дает возможность рассчитать местоположение радиозонда в трех измерениях как функции времени.

Слежение с использованием радионавигационных сигналов впервые стало широко применяться с введением в действие навигационных цепей наземной системы «Омега», однако после выведения ее из строя большинство этих операторов радиозондов перешли на системы определения параметров ветра ГСOM. Использовались также наземные сигналы дальней навигации системы «Лоран», описанные в публикации ВМО (WMO, 1985). Покрытие, обеспечиваемое системой «Лоран-С» совместно с российской системой «Чайка», в последние годы сократилось, и в настоящее время эти системы используются в основном только в Восточной Европе, когда функционирует «Чайка».

В повседневной метеорологической практике шире стала использоваться навигационная система слежения ГСОМ, что связано с высокой степенью автоматизации, которая может быть достигнута при выборе этого типа системы измерения ветра. Масштаб работ, связанных с обслуживанием наземного оборудования данной системы, также весьма незначителен. Измерения высоты радиозондами ГСОМ обеспечивает наилучший метод определения высот для точных измерений стратосферных температур при исследованиях климата.

Все первые радиозонды ГСОМ использовали для передачи данных на наземные системы полосы частот Вспомогательной службы метеорологии (ВСМ) с центром на 403 МГц, однако существует несколько стран, для которых широкомасштабное гражданское радиозондирование в этой полосе частот является невозможным, поэтому были также разработаны радиозонды ГСОМ, использующие полосу более высоких частот ВСМ с центром на 1 680 МГц.

13.1.4.2 **Слежение с использованием направленной антенны**

На многих крупных национальных сетях в связи с более высокой стоимостью расходных материалов радиозондов ГСОМ продолжают использовать радиозонды, не оборудованные системой ГСОМ, с наземной системой, позволяющей следить за мишенью с помощью направленной антенны, определяющей азимут и любые два из следующих параметров: угол места, наклонная дальность и высота. Измерения в основном проводятся с использованием радиотеодолита или вторичного радиолокатора (см. 13.2.3.2) для слежения за радиозондом, прикрепленным к шару-зонду. В некоторых случаях для слежения за шаром-зондом используется оптический теодолит. Первичный радиолокатор (см. 13.2.3.1) также может следить за отражающей мишенью, прикрепленной к шару-зонду, однако, несмотря на довольно широкое применение в прошлом, в настоящее время эта система обычно не применяется. Разница между первичным и вторичным радиолокаторами заключается в том, что первичный радиолокатор улавливает импульсы, отраженные от своей мишени, тогда как вторичный радиолокатор только передает импульсы и не улавливает отраженный сигнал. В случае со вторичным радиолокатором радиозонд/приемоответчик, прикрепленный к шару-зонду, получает импульсы от радиолокатора и затем передает информацию о времени получения на наземную радиолокационную станцию. Точность слежения за углом места и азимутом при использовании радиолокационных и радиотеодолитных систем обычно имеет порядок $0,1^\circ$, в то время как для радиолокационных систем ошибка по дальности обычно должна составлять менее 30 м.

Современные радиотеодолитные системы с антенной, размером менее 2 м, наиболее подходят для измерений ветра на высотах, когда угол места шара-зонда превышает $10\text{--}15^\circ$. Системы вторичных радиолокаторов продолжают использовать на национальных сетях, где имеется достаточно широкий спектр радиочастот в полосах частот, выделенных для метеорологических целей. Эффективные направленные антенны используются в основном в полосе частот 1 680 МГц, поскольку размер антенны, необходимой для непосредственного слежения на частоте 403 МГц, слишком велик для большинства видов оперативных применений.

Выбор между использованием радиотеодолита или радиозонда ГСОМ для измерения ветра на высотах будет частично зависеть от максимальной наклонной дальности, ожидаемой в месте наблюдения. Система измерения ветра ГСОМ обеспечит хорошую точность измерений при очень большой дальности. Максимальная дальность существенно изменяется в зависимости от широты, при этом дальность 70 км достаточна в экваториальных и полярных районах, но она может достигать по меньшей мере 200 км в некоторых среднеширотных зонах. В таблице 13.1 представлена повторяемость зондирований с превышением определенной наклонной дальности для шара-зонда на высоте 30 км. Данные приводятся по станциям, расположенным в Европе в зоне $50\text{--}60^\circ$ с. ш. Число зондирований дается за целый год, но следует отметить, что зондирования с превышением пределов наклонной дальности в основном приходятся на зимний период.

Таблица 13.1. Повторяемость зондирований с превышением наклонной дальности (для шара-зонда на высоте 30 км)

Превышенная наклонная дальность (км)	140	160	175	190
Повторяемость (%)	5	2	1	0,5

13.2 ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

Системы радиоветрового зондирования первоначально стали применяться для проведения измерений ветра на высотах при наличии облачности. Они также позволяют достичь высокой точности измерений при большой дальности для слежения за шарами-зондами на высотах до 30 км. Использование этих систем в настоящее время позволяет удовлетворять большую часть современных требований к точности измерения ветра на высотах. Высокая степень автоматизации, возможная в случае применения наиболее современных систем радиоветрового зондирования, исключила необходимость вмешательства оператора в большую часть цикла измерений. Преимущество этих систем заключается также в том, что их использование позволяет сократить расходы при метеорологических работах.

13.2.1 Оптический теодолит

Оптические теодолиты могут использоваться для слежения за шарами-зондами, когда расходы на проведение радиоветровых измерений не могут быть оплачены, например, в промежутках между основными подъемами или в других местах страны для заполнения пробелов в данных на сети на нижних уровнях (см. WMO, 2008). Операторам требуется значительная подготовка и профессионализм, чтобы не происходило быстрого увеличения ошибок измерений ветра на высотах при подъеме шара-зонда выше пограничного слоя, однако в некоторых частях Южной Америки и Африки достигнута приемлемая длительность периодов наблюдений.

Оптическая система шаропилотного теодолита должна быть такой, чтобы ось окуляра оставалась горизонтальной независимо от направления оптической трубы. Предпочтительно использовать пятиугольную, а не прямоугольную призму, так как незначительное смещение первой не влияет на перпендикулярность обеих частей оптической оси.

Труба, фокусирующая окуляр, который должен быть снабжен пересекающимися линиями или сеткой нитей, должна иметь увеличение в 20–25 раз по диаметру и угол зрения не менее 2°. Конструкция основания теодолита должна быть прочной. Следует обеспечить возможность быстрого вращения теодолита вручную или медленного, с помощью фрикционной и червячной передач на азимутальных и вертикальных кругах. Эти круги должны быть подразделены на сектора с ценой деления не более 1° и снабжены верньерами или ручными колесиками микрометра, позволяющими определять углы с точностью до 0,05° и возможной погрешностью до 0,01°. Расположение шкал и их освещение должны обеспечивать возможность для считывания показаний днем и ночью. Люфт приводного механизма кругов не должен превышать 0,025°. Ошибки горизонтальной и вертикальной юстировки не должны превышать 0,1°.

Для облегчения слежения за быстро перемещающимся шаром-зондом теодолит должен быть оснащен визир-искателями. Также полезно для этой цели использовать вторую трубу с широким углом зрения — не менее 8°.

Основание теодолита должно быть смонтировано так, чтобы его можно было крепить к стандартной треноге или на другую опору. Он должен быть снабжен устройством для точной установки горизонтального положения. Штатив должен регулироваться по росту наблюдателя. Теодолит должен иметь прочную конструкцию и защиту от коррозии.

Система должна использоваться вместе с соответствующей компьютерной программой для ввода и проверки данных наблюдений на наличие ошибок.

13.2.2 Радиотеодолит

Определение ветра с помощью радиотеодолита наиболее подходит для ситуации, когда угол места шара-зонда по отношению к наземной станции достаточно велик на протяжении всего полета. Если угол места шара-зонда превышает приблизительно 16° , большая часть требований к точности измерений ветра на высотах, изложенных в настоящем томе, глава 12, может быть удовлетворена с помощью относительно небольших антенн слежения. При малых углах места шара-зонда ошибки измерений с использованием радиотеодолитов быстро возрастают с уменьшением угла места даже при больших антеннах слежения (см. 13.5.3). При постоянно сильном ветре на высотах крайне трудно удовлетворять требованиям к точности, изложенным в настоящем томе, глава 12, используя радиотеодолит, если не применять приемоответчик для обеспечения измерения наклонной дальности (см. 13.2.3.2).

Радиотеодолит обычно используется для отслеживания излучения радиозонда, подвешенного к метеорологическому шару-зонду. Направленная антенна, соединенная с радиопередатчиком, вращается вокруг вертикальной и горизонтальной осей для определения силы максимального сигнала с помощью соответствующих сервомеханизмов. Обычно используется радиочастота 1 680 МГц. Хорошо сконструированная антенна диаметром около 2 м должна иметь низкую чувствительность в области боковых лепестков относительно основного луча; при таком размере может быть достигнута точность углового слежения, равная $0,1^\circ$. В этом случае радиотеодолит должен иметь возможность обеспечивать слежение при малых углах места (6° – 10°) без интерференции сигналов, получаемых непосредственно от радиозондов и отраженных от примыкающих поверхностей. Интерференция между прямыми и отраженными сигналами называется многолучевой интерференцией и обычно ограничивает возможности слежения с помощью радиотеодолита при малом угле места шара-зонда. Величина многолучевой интерференции в значительной степени зависит от позиционирования антенны в зависимости от соответствующих отражающих поверхностей вне зависимости от того, располагается радиотеодолит на крыше или на поверхности земли.

Подробное описание характеристик радиотеодолитной антенны, системы обнаружения, серво-контроля, а также алгоритмов обработки данных следует получить от производителя до покупки. При использовании современных переносных радиотеодолитов с антенной размером менее 2 м можно столкнуться с проблемами многолучевой интерференции при угле места порядка 16° . Когда происходит многолучевая интерференция, как правило, невозможно поймать максимальный сигнал в направлении шара-зонда. Ошибка по высоте изменяется с течением времени, поскольку изменяются условия многолучевой интерференции по мере перемещения радиозонда; это может привести к большим систематическим ошибкам при измерении ветра (более $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Во время слежения за радиозондом с помощью радиотеодолита наблюдаемые азимут и угол места передаются с радиотеодолита на наземную компьютерную систему. По результатам измерений, поступающих с радиозонда, со временем можно получить данные об изменении геопотенциальной высоты, соответствующей наблюдаемым направлениям. Затем может быть рассчитана скорость изменения положения шара-зонда. Компьютер должен представлять результаты измерений ветра на высотах в табличной или графической форме. Непрерывность данных о ветре по вертикали позволит оператору проверить ошибки в слежении. Если оператор удовлетворен качеством слежения, может выпускаться соответствующая сводка о ветре на высотах для потребителей.

Иногда вскоре после запуска направление перемещения шара-зонда меняется на противоположное из-за значительного сдвига ветра, наблюдаемого непосредственно над поверхностью земли. Если при этом радиотеодолит должен обеспечивать автоматизированное слежение с хорошей точностью, он должен обладать очень высокой скоростью сканирования при определении азимута и угла места. Это ведет к повышению требований к техническим характеристикам по сравнению с теми, которые необходимы для большинства полетов, когда шар-зонд находится на большем удалении. Для того чтобы снизить требования к механическим характеристикам, необходимым для точного слежения, несколько современных конструкций радиотеодолитов включают интерферометрическое слежение. В этих системах интерферометр сравнивает фазы сигналов, поступающих на различные участки антенны слежения для того, чтобы определить положение передающего источника по отношению к ориентации антенны. На практике фазовые данные измеряются с высокой скоростью с использованием микропроцессоров, в то время как простой сервомеханизм ориентирует антенну приблизительно в направлении радиозонда. Приближенная ориентация антенны необходима для обеспечения хорошего соотношения сигнала и шума для интерферометра и для минимизации отражений, получаемых от земли. Угол места и азимут затем рассчитываются на основе сочетания положений антенны, в то время как направление на источник выводится интерферометром на основе фазовых измерений. Достигаемая точность измерений аналогична точности лучших стандартных радиотеодолитов. Системы интерферометрических радиотеодолитов часто являются более надежными и, таким образом, более дешевыми в эксплуатации.

13.2.3 Радиолокатор

13.2.3.1 Первичные радиолокаторы

Отличительной особенностью метода слежения с помощью радиолокатора по сравнению с методом, предполагающим использование радиотеодолита, является возможность измерения наклонной дальности непосредственно вместе с азимутом и углом места. Первичный радиолокатор основан на эффекте обнаружения импульсов ультракоротких радиоволн, отраженных от соответствующей мишени, поднимаемой шаром-зондом. При наличии надежного первичного радиолокатора требования к точности для измерения ветра на высотах, изложенные в настоящем томе, глава 12, могут быть удовлетворены почти при всех обстоятельствах. Очень высокие точностные характеристики при измерении ветра на высотах могут достигаться путем прослеживания с помощью прецизионных радиолокаторов, однако на практике они очень дороги в использовании. Для обеспечения точности измерений выше приблизительно $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ важно использовать шары-зонды с отражающей поверхностью (которые являются очень дорогими), а не стандартные метеорологические шары-зонды.

При измерении ветра с помощью первичного радиолокатора не требуется использование радиозонда — достаточно соответствующего отражателя. Существенная экономия от минимизации расходов на радиозонды возможна в тех случаях, когда существуют структуры технической поддержки по эксплуатации радиолокатора и расходы на персонал невысоки. Однако в развивающихся странах использование первичного радиолокатора в качестве устройства для измерения параметров ветра в обеспечение низкой стоимости оперативных измерений не имело успеха из-за недостаточного уровня технической поддержки. В большинстве стран в настоящее время используют радиозонды ГСОМ или радиотеодолиты.

13.2.3.2 Вторичные радиолокаторы

В системах вторичной радиолокации импульсы энергии, передаваемые с наземной станции, принимаются системой ответчика, подвешенной к шару-зонду. Ответчик может представлять собой отдельный блок или включаться в основную конструкцию радиозонда. Частота обратного сигнала может отличаться от частоты излучаемого сигнала. Время

между передачей импульса и реакцией ответчика позволяет измерять непосредственно наклонную дальность. Система такого типа до сих пор широко используется на крупных национальных сетях.

Преимущество этого метода над методом первичной радиолокации состоит в возможности обеспечения большей дальности слежения для заданной выходной мощности наземного передатчика. Это происходит потому, что энергия, передаваемая ответчиком, не зависит от энергии, которую он получает от наземного передатчика, а обычно и превышает ее. Таким образом, энергия, получаемая наземным приемником, обратно пропорциональна квадрату наклонной дальности цели. В случае первичной радиолокации получаемая энергия обратно пропорциональна четвертой степени наклонной дальности.

По сложности конструкции и эксплуатационным требованиям система вторичной радиолокации, как правило, находится между радиотеодолитами и системами первичной радиолокации. Операторы сети должны иметь возможность обеспечить хорошее обслуживание этих систем. Например, в Российской Федерации некоторые более старые системы (см. таблицу 13.4), которые обладают хорошими характеристиками слежения и широко используются, но трудны в обслуживании, заменяют на относительно более легкие в обслуживании усовершенствованные системы наземного слежения (см. WMO, 2005).

13.2.4 Навигационные системы слежения

В навигационных системах слежения в радиозонд встроена антенная система, которая принимает сигналы с радионавигационной системы. Эта радионавигационная система предназначена для использования агентствами, не зависящими от национальных метеорологических служб. В настоящее время в качестве навигационных систем, применяемых для оперативного измерения параметров ветра, применяются спутниковые ГСОМ с глобальным охватом и системы «Лоран», в которых используются наземные передатчики с очень ограниченным районом охвата.

Одним из основных преимуществ навигационных систем является простота наземной системы, в которой отсутствуют передвижные части и не требуется очень точная настройка антенн слежения. В связи с этим такие системы пригодны для установки на воздушных и морских судах, а также на наземных системах определения ветра.

Для минимизации расходов на обработку сигналов большая часть обработки с целью получения данных о ветре с помощью сигналов системы «Лоран» осуществляется после ретрансляции радиозондом навигационных сигналов обратно на наземную систему. Таким образом, для этой системы обнаружения ветра является существенным хороший прием сигналов, поступающих с радиозонда; выбор местоположения антенн наземной системы должен обеспечивать прямую видимость радиозонда во всех направлениях. Поскольку стоимость устройств ГСОМ, обрабатывающих сигналы ГСОМ, снижается, появилась возможность осуществлять основную обработку сигналов ГСОМ на радиозонде, хотя обработка на земле также необходима для учета информации об образцовых сигналах ГСОМ, получаемых локальной антенной на земной поверхности. При нормальном функционировании точность определения положения радиозонда при помощи систем ГСОМ не уменьшается существенным образом в зависимости от дальности (см. WMO, 2011b).

Основные проблемы оперативного использования современных радиозондов ГСОМ возникают, когда в непосредственной близости расположен радиопередатчик, работающий на частоте, создающей помехи для получения радиозондом сигналов ГСОМ.

Высота определяется на основе радиозондовых измерений геопотенциала. Крайне важно, чтобы время определения обработанных ветровых данных, полученных с помощью навигационной системы наземной системой, точно соответствовало времени определения данных измерений высоты радиозонда.

13.2.4.1 **Использование навигационных сигналов в будущем**

Международные навигационные системы перешли, главным образом, на навигацию с использованием сигналов, поступающих от группировки навигационных спутников ГСОН, вращающихся вокруг Земли. Использование спутниковых сигналов в значительной мере заменило практику использования сигналов, поступающих от фиксированных наземных передатчиков. Еще одной системой спутниковой навигации является система ГЛОНАСС в Российской Федерации. Также недавно введены в действие системы «Бэйдоу» (КОМПАСС) в Китае и «Галилео» в Европе, и ведется подготовка к началу их использования в качестве глобальных служб до 2020 г. Ограниченное число стран предпочли сохранить наземные навигационные системы «Лоран» для региональных и национальных навигационных сетей. Следует проконсультироваться с руководящими органами в области навигации в отношении использования этих сигналов в будущем до того, как будет рассмотрен вопрос о долгосрочных вложениях в данную систему.

Несмотря на то, что расчет данных о ветре в случае использования навигационной системы ГСОН является более сложным, чем в случае получения сигналов навигационных систем с наземных передатчиков, поскольку спутники постоянно перемещаются относительно радиозондов, темпы разработки систем радиозондов ГСОН возрастают, так что 11 систем разных производителей прошли тестирование при проведении взаимных сравнений систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (см. WMO, 2011b). Лишь у немногих конструкций были выявлены какие-либо значительные проблемы; большинство же достаточно адекватно принимают сигнал (с пяти до восьми спутников одновременно в конкретный момент времени) и имеют соответствующие алгоритмы обработки данных, связывающие сигналы ГСОН, принимаемые радиозондом, с сигналами, получаемыми опорной антенной на поверхности земли.

13.2.4.2 **Глобальная система определения местоположения**

Радиозонды ГСОН в настоящее время применяются примерно на половине активных станций глобальных сетей радиозондирования.

НАВСТАР ГСОН является очень точной радионавигационной системой, основанной на использовании радиосигналов, передаваемых группировкой из 25 спутников, находящихся на околоземной орбите в шести плоскостях. Плоскость каждой орбиты пересекает экватор на расстоянии 60° друг от друга, при этом плоскости наклонены под углом в 55° к полярной оси. Период обращения спутника составляет около 11 ч 58 мин. Конфигурация этой системы спутников такова, что в любом месте на земном шаре как минимум четыре спутника находятся над горизонтом круглосуточно, однако в некоторых ситуациях в пределах радиовидимости с поверхности Земли может находиться до восьми спутников.

Сигналы, передаваемые с этих спутников, контролируются атомными эталонами частоты, предназначенными для обеспечения стабильности по частоте с точностью, превышающей $1 \cdot 10^{-13}$. Каждый спутник передает два уникальных псевдослучайных цифровых дальнометрических кода, наряду с информацией, включающей данные о прохождении спутников системы, эфемериды, ВСВ и рабочие параметры спутников. Дальнометрические коды и данные о системе передаются с использованием двухфазной цифровой технологии расширения спектра. Уровень мощности сигналов дальнометрических кодов составляет -130 дБм, т. е. значительно ниже теплового фоновых шума.

Принимаются во внимание следующие коды:

- а) Код грубого разрешения передается на несущей частоте 1 575,42 МГц. Эта частота модулируется специальным спутниковым кодом псевдослучайного шума с частотой модулирующего сигнала в 1,023 МГц. Такая модуляция эффективно расширяет спектр полосы кода грубого разрешения до 2 МГц;

- b) Код высокого разрешения может заменяться контролируемым военным кодом Y в те периоды, когда задействовано устройство для защиты от помех. Код высокого разрешения и данные о системе передаются когерентно на несущих частотах L1 (1 575 МГц) и L2 (1 228 МГц).

Длины волн для сигналов ГСОМ значительно меньше, чем для системы «Лоран». Для приема сигналов ГСОМ используются гораздо меньшие антенны, устанавливаемые на верхней части корпуса радиозонда таким образом, чтобы во все стороны по направлению к горизонту отсутствовали какие-либо экранирующие элементы. Небольшая антенна лучше защищена от помех, возникающих за счет атмосферного электричества, чем антенны систем «Лоран». Хотя монтаж антенны ГСОМ может вызвать сложности с размещением на радиозонде датчика температуры, в существующих сейчас конструкциях эта проблема устранена.

Сигналы ГСОМ нуждаются в предварительной обработке на радиозонде, для того чтобы сократить информацию ГСОМ до таких сигналов, которые могут передаваться на наземную станцию на несущей частоте радиозонда (либо в виде аналоговой информации, как это делалось в случае применения систем «Лоран», либо в виде потока цифровых данных). Предварительная обработка может обеспечиваться различными методами. Современные радиозонды ГСОМ используют код высокого разрешения в дифференциальном режиме. Это требует одновременного приема сигналов ГСОМ приемником наземной станции и приемником на радиозонде. Точные расчеты ветра требуют получения сигналов как минимум с четырех спутников. В дифференциальном режиме фазовое смещение сигналов, принимаемых радиозондом, соотносится с принимаемыми на наземной станции. Это особенно удобно, когда радиозонд находится около наземной станции, поскольку ошибки по определению местоположения, возникающие за счет задержки при распространении радиоволн со спутника до приемников или из-за устройства для защиты от помех, аналогичны для обоих приемников и могут быть в значительной степени устранены.

Системы слежения, использующие ГСОМ, могут обеспечивать точное слежение при очень большом числе измерений (каждые несколько секунд). Поэтому можно измерять изменение истинной горизонтальной скорости, так как радиозонд раскачивается как маятник под шаром-зондом с периодом колебаний примерно 10–15 с. В основном небольшие различия в измерениях ветра радиозондами ГСОМ, проводимых в Янцзяне, Китай, явились результатом использования алгоритмов отфильтровывания движений шара-зонда, отличных от алгоритма, часто специально подгоняемого к конкретной конфигурации подвески радиозонда, и не применявшегося при сравнении радиозондов (WMO, 2011b).

Одной из практических проблем в отношении радиозондов ГСОМ является время, которое требуется для того, чтобы устройство слежения ГСОМ, установленное на радиозонде, синхронизировалось с сигналами, получаемыми со спутников. Не рационально запускать радиозонд до завершения синхронизации. Данный процесс может потребовать размещения радиозонда снаружи на несколько минут перед запуском или, в качестве альтернативы, использования метода для передачи сигналов ГСОМ на радиозонд в место осуществления предварительной подготовки.

13.2.4.3 Цепи передатчиков «Лоран-С»

Система «Лоран-С» представляет собой средство, функционирующее с помощью навигационных систем, которое имеет относительно большой радиус действия и действует в полосе низких частот с центром на 100 кГц (длина волны 3 км). Поскольку в основном эта система используется для морской навигации, в частности, в прибрежных и континентальных шельфовых районах, она применяется только в определенных частях земного шара. Это, в основном, морские районы северного полушария. Некоторые передатчики цепи «Лоран» были модернизированы новыми собственниками для обеспечения региональной и национальной морской навигационной сети.

Передача «Лоран-С» состоит из групп восьми или девяти импульсов несущей частоты 100 кГц, длительность каждого из которых составляет 150 мкс. Каждая цепь передатчиков состоит из одной ведущей станции и двух или более смежных. По существу, последовательность цепи устанавливается относительно передачи ведущей станции. Каждая смежная станция передает свои группы импульсов в строго фиксированные интервалы времени после ведущей со скоростью, которая определена для данной цепи, — обычно один раз в каждые 100 мкс.

Сигналы «Лоран-С» распространяют как приземные, так и пространственные волны, отраженные от ионосферы. Распространение приземных волн относительно стабильно. Имеются только очень небольшие фазовые коррекции, которые зависят от того, распространяются сигналы вдоль суши или моря. Скорость изменения фазовой коррекции по мере изменения положения радиозонда обычно не настолько велика, чтобы влиять на точность измерения ветра. Распространение пространственных волн является более изменчивым, поскольку оно зависит от состояния ионосферы и времени суток. Сигналы приземных волн, поступающие от передатчика, существенно сильнее, чем сигналы пространственных волн, но пространственные волны затухают значительно медленнее, чем приземные волны. Таким образом, для системы измерения ветра «Лоран-С» ситуация является наилучшей, когда в сигналах, получаемых радиозондом со всех передатчиков, преобладают приземные волны. Это может быть достигнуто в части районов, охватываемых системой «Лоран-С», но не везде в пределах теоретического охвата системы.

Радиозонд системы «Лоран-С» получает сигналы через свою собственную антенну и затем модулирует несущую частоту радиозонда, с тем чтобы передать сигналы приемнику радиозонда. Устройство слежения «Лоран», используемое для определения времени поступления импульсов системы «Лоран», должно позволять в определенной степени дифференцировать сигналы приземных и пространственных волн. Это достигается посредством определения времени поступления ведущих частей импульсов. Современные устройства слежения «Лоран» могут работать в режиме пересечения цепей, когда сигналы от более чем одной цепи «Лоран» могут использоваться вместе. Эта аппаратура важна для качественных измерений ветра во многих частях районов, обслуживаемых системой «Лоран-С». Данные о ветре рассчитываются на основании скорости изменения во времени разностей поступления сигнала между парами передатчиков «Лоран-С». В расчетах используются все имеющиеся надежные сигналы «Лоран-С», а не минимальный набор из трех сигналов.

Определение местоположения с использованием системы «Лоран» для работающих радиозондов в настоящее время очень ограничено.

13.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

13.3.1 Общие сведения, касающиеся обработки данных

Современные датчики слежения могут производить отсчеты не за интервалы в 1 мин, как это обычно делалось на использовавшихся ранее неавтоматических системах, а намного чаще. Обработка данных о ветре, как правило, будет полностью автоматизирована при использовании включенного в систему наземного компьютера. Данные о ветре на высотах будут накапливаться и демонстрироваться оператором на экране в целях проверки до того, как информация будет выпускаться для пользователей.

Таким образом, отбор данных по слежению оптимально производится с интервалами в 10 с и менее. Отбор данных должен производиться с наиболее высокой частотой, которая считается полезной для получения информации по системе слежения. Высокая интенсивность производства наблюдений облегчает контроль за качеством данных с помощью автоматизированных систем обработки. После редактирования данные слежения могут быть сглажены с использованием методов математической статистики и использованы для определения изменения местоположения со временем, если это

требуется. Применяемое сглаживание позволит определить толщину атмосферного слоя, к которому относится измерение ветра на высотах. Сглаживание часто необходимо будет изменять для отдельных участков полета с учетом различных потребностей пользователей в отношении данных для различных высот и ограничений используемой системы измерения ветра на высотах. Если точность измерения на верхних уровнях становится слишком низкой, то вертикальное разрешение производимых измерений может быть установлено ниже оптимальных требований, для того чтобы ошибка измерений ветра находилась в приемлемых пределах.

В эффективных алгоритмах для редактирования и сглаживания можно использовать многочлены низшего порядка (Acheson, 1970) или кубические сплайны (de Boor, 1978). Алгоритмы для расчета ветра по данным радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений могут быть найдены в публикации ВМО (WMO, 1986). В целом ветер может определяться или по изменению местоположения, рассчитанному с помощью данных слежения, или по степени изменения сглаженных измеряемых переменных системы слежения (см. Passi, 1978). Многие современные системы используют последнюю методику, однако при этом необходимы такие алгоритмы, которые позволяют решить проблемы, связанные с некоторыми особенностями измеряемых переменных, например, в тех случаях, когда шар перемещается с большим углом места в обратном направлении над площадкой, с которой проводится слежение.

Когда ветер рассчитывается по данным слежения и демонстрируется для проверки, то важно при этом указать те районы полета, для которых данные слежения отсутствуют или считается, что шум слишком велик, чтобы эти данные можно было использовать. Некоторые из алгоритмов, применяемых для интерполяции, могут быть недостаточно стабильными в тех случаях, когда имеются пробелы в данных слежения. Важно проводить различие между надежными измерениями вертикального сдвига ветра и ложными сдвигами, которые являются результатом автоматической обработки данных, когда данные слежения отсутствуют. Часто в начале подъема шара качество данных слежения достаточно низкое. В случае если система измерения ветра на высотах не позволяет произвести корректного измерения ветра вскоре после запуска, предпочтительно оставить пробел в сообщаемых данных по ветру до того момента, к которому будут получены корректные данные слежения. Это обусловлено тем, что интерполяция между поверхностью и первыми уровнями достоверных данных часто требует интерполяции по слоям, в которых отмечается вертикальный сдвиг ветра. При таких условиях автоматизированная система обработки редко функционирует удовлетворительно.

13.3.2 Шаропилотные наблюдения

Точная установка по уровню и ориентирование оптического теодолита относительно истинного севера выполняется заведомо до наблюдений за азимутом и углами места движущегося шара. Отсчеты азимута и угла места должны производиться с интервалами не менее 1 мин. Азимут должен отсчитываться с точностью до десятой доли градуса. При подъеме шара-пилота угол места отсчитывается с точностью до десятой доли градуса при значениях 15° или больше. Если угол места составляет менее 15° , необходимо измерять его с точностью до $0,05^\circ$.

Если при подъеме радиозонда дополнительно используется оптический теодолит, можно получить большую точность измерений ветра на меньших высотах. Таким образом, углы места должны отсчитываться до десятой доли градуса, когда их значения превышают 20° , с точностью до $0,05^\circ$ при их значениях 20° или менее, но более 15° и с точностью до $0,01^\circ$, когда углы места составляют 15° или менее. Отсчет времени может осуществляться либо с помощью секундомера, либо с помощью специального таймера, который подает звуковые сигналы через заданные промежутки времени.

Определение скорости и направления ветра при наблюдениях с использованием одного теодолита основано на тригонометрических вычислениях ежеминутных изменений положения шара-пилота в горизонтальной плоскости. Для этого лучше всего использовать соответствующее компьютерное программное обеспечение.

Если необходима более высокая точность, то следует использовать метод двух теодолитов. Длина базисной линии между приборами должна составлять, по крайней мере, 2 км и располагаться по возможности под прямым углом к направлению преобладающего в данный момент ветра. Расчеты упрощаются, если обе площадки для слежения находятся на одном уровне. Связь между двумя площадками с помощью радио или наземной линии помогает синхронизировать наблюдения с обоих мест. Синхронизация необходима в том случае, если нужно произвести измерения с высокой точностью. Регистрирующие теодолиты, в которых отсчеты записываются с помощью электроники, будут также полезны для достижения большей точности измерений.

Для слежения с помощью нескольких теодолитов могут использоваться альтернативные процедуры оценки. Избыточность, которая обеспечивается всеми данными слежения, позволяет повысить точность измерений, однако дополнительная проблема при этом заключается в том, что вычисления должны выполняться с помощью персонального компьютера (см. Lange, 1988; Passi, 1978).

13.3.3 Наблюдения с использованием направленной антенны

Системы измерения ветра, которые обеспечивают слежение посредством использования направленных антенн, требуют очень тщательного соблюдения процедур установки и технического обслуживания. Необходимо приложить все усилия для обеспечения точного измерения угла места и азимута, что требует точного соблюдения горизонтальности установки и тщательного технического обслуживания, для того чтобы обеспечить такое положение, при котором электрическая ось антенны находится в положении, близком к положению механической оси. Это можно проверить различными методами, включая наведение на местные передатчики или цели, местоположение которых известно. В последние годы плохая ориентация по азимуту вызывала дополнительные ошибки при измерениях ветра на многих аэрологических станциях.

Калибровка наклонной дальности первичного радиолокатора может быть проверена посредством использования соответствующих стационарных мишеней, если таковые имеются. Проверка слежения радиолокатора в целом может быть осуществлена посредством сравнения геопотенциальных высот, полученных с помощью радиолокатора, с данными одновременных радиозондовых измерений. Вопрос о поправках к данным измерений высот радиолокатором за счет ошибок слежения, обусловленных атмосферной рефракцией, излагается в 13.7.

Сравнение значений высоты, полученных с помощью радиолокатора, со значениями высоты геопотенциала, полученными с помощью радиозондов ГСОМ, может быть использовано для выявления случаев, когда слежение с помощью радиолокатора не удовлетворяет стандартным требованиям. Более того, если известно, что измерения радиолокатором наклонной дальности надежны, то можно определить небольшие систематические ошибки по углу места посредством сравнения высот, измеренных с помощью радиолокатора, с высотами, полученными с помощью радиозонда, как функцию котангенса угла места. Типичные ошибки при определении радиозондом ГСОМ высоты геопотенциала были определены ВМО для большинства используемых радиозондов (WMO, 2011b).

При использовании как радиолокационных, так и радиотеодолитных систем, встречаются трудности при попытке слежения за мишенью на малом расстоянии. Это обусловлено тем, что сила сигнала, принимаемого боковым лепестком антенны, может быть достаточно большой для поддержания автоматического слежения на малом расстоянии, однако при слежении на боковом лепестке сила принимаемого сигнала затем быстро уменьшается, и через несколько минут мишень, очевидно, будет потеряна. После потери мишени, возможно, будет сложно восстановить слежение с помощью некоторых систем при наличии на пусковой площадке низкой облачности, дождя или тумана. Поэтому необходимо иметь метод проверки того, что мишень находится в центре главного лепестка в начале полета. Такая проверка может проводиться оператором с использованием визира, телескопа или видеокамеры, ориентированных по оси антенны. Смещение

слежения труднее проверить с помощью интерферометрического радиотеодолита, когда механическое слежение радиотеодолита необязательно совпадает точно с наблюдаемым направлением перемещения шара.

13.3.4 Наблюдения с использованием радионавигационных систем

О развитии наблюдений с определением параметров ветра по ГСОМ впервые упоминают Call (WMO, 1994) и Kaisti (1995). Эти системы не декодировали поступающие сигналы ГСОМ, однако в настоящее время вместо них все шире используются радиозонды ГСОМ, которые эти сигналы декодируют.

Геометрия использования сигналов спутниковой навигации такова, что алгоритмы обнаружения ветра с использованием ГСОМ представляются наиболее надежными в том случае, если сигналы поступают, по меньшей мере, с пяти спутников в процессе подъема. Для определения периодов, в которые геометрия расположения спутников не обеспечивает возможности обнаружения ветра, следует использовать данные о прохождении спутников ГСОМ. На практике, при существующих конфигурациях спутников такие ситуации происходят достаточно редко, а с современными радиозондами используется хорошая антенна для приема спутниковых сигналов.

При проведении измерения ветра на высотах с использованием систем слежения с помощью навигационных средств наземная аппаратура навигационного слежения должна быть точно синхронизирована с передачами сигналов навигационных средств еще до запуска. Синхронизация обычно достигается путем использования сигналов, принимаемых местной антенной, связанной с приемником наземной системы. Эта антенна должна обеспечивать прием адекватных сигналов для синхронизации при любых погодных условиях, которые, возможны в данном пункте. Наземная система должна также обеспечивать оператору четкую индикацию поступающих сигналов навигационных систем для определения ветра как до запуска, так и в ходе полета радиозонда. Когда радиозонд ГСОМ используется для проведения измерений высоты в ходе оперативного подъема, важно точно определить и внести в программное обеспечение обработки данных наземной станции высоту локальной антенны ГСОМ относительно поверхности земли.

После запуска системы определения ветра с помощью навигационных средств работают в значительной степени в автоматизированном режиме. Однако оценки ожидаемых ошибок при измерениях, основанные на конфигурации и качестве принимаемых сигналов навигационных средств, будут полезны для операторов. В ходе полета оператор должен выявлять радиозонды, имеющие отказы, с плохими характеристиками приема или передачи, данные наблюдений которых явно не удовлетворяют стандартным требованиям. Эти данные наблюдений необходимо исключать и по мере необходимости пытаться произвести повторный запуск.

Для того, чтобы удовлетворительным образом произвести аэрологические измерения при помощи наземных радионавигационных систем «Лоран», необходимо, чтобы радиозонд принимал сигналы, по крайней мере, с трех станций «Лоран». Разность во времени поступления навигационных сигналов, принимаемых радиозондом после когерентной передачи из двух мест, определяет местоположение или линию положения (см. WMO, 1985). Линия положения представляет собой гиперболу на плоскости (хотя становится эллипсом на поверхности сферы). Поэтому навигационные системы, использующие данный метод, называют гиперболическими. Двух пересекающихся линий положения достаточно для определения положения на плоскости. Однако при этом может возникнуть большая ошибка в определении положения, связанная с небольшой ошибкой во времени поступления сигналов, если линии местоположения близки к параллельным, когда они пересекаются. В отношении навигационных систем измерения ветра на высотах «Лоран» было четко продемонстрировано, что все имеющиеся навигационные сигналы данного типа (обычно, по крайней мере, четыре или пять) должны использоваться для улучшения надежности слежения. Один тип алгоритма, использовавшийся для всех имеющихся навигационных сигналов, был описан в работе Karhunen (1983).

13.4 РАЗМЕЩЕНИЕ НАЗЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соответствующая площадка для радиотеодолита или радиолокатора располагается на высоком, по возможности открытом месте. Не должно быть обширных препятствий, закрывающих угол более 6° в точке наблюдения. Идеальным местом может быть симметричный холм с пологими (около 6°) склонами протяженностью 400 м в ложине, окруженной холмами, склоны которых поднимаются под углом 1° – 2° .

Для установки системы слежения необходим надежный фундамент, на котором можно монтировать оборудование. Проведение измерений с помощью навигационных средств будет успешным в случае хорошего приема сигналов местной антенной навигационных средств и антенной наземной системы для радиозонда. Эти антенны должны монтироваться на площадке для проведения аэрологических наблюдений, где обеспечена открытость горизонта для хорошего приема со всех направлений.

Результаты измерений ветра на высотах обычно сообщаются вместе с результатами измерений приземного ветра. Предпочтительно, чтобы приземный ветер наблюдался с площадки, расположенной близко к месту запуска шара-пилота. Площадка для запуска должна выбираться таким образом, чтобы получаемые данные о ветре соответствовали целям проведения измерений ветра на высотах. Например, в случае если данные о ветре на высотах необходимы для определения локальных воздействий в масштабе аэродрома, оптимальное местоположение площадки может отличаться от того, которое необходимо для наблюдения за движениями мезо-масштаба и синоптического масштаба.

13.5 ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

13.5.1 Общие положения

Ошибки при измерении ветра на высотах представляют собой сочетание ошибок, связанных с несовершенным слежением за горизонтальным перемещением мишени, ошибок определения высоты мишени и различий между движением мишени и фактическим движением атмосферы.

13.5.1.1 *Ошибки при слежении за мишенью*

Взаимосвязь между ошибками измерения ветра и ошибками слежения зависит от применяемого метода наблюдения. Для некоторых систем, таких как радиотеодолиты, ошибки определения ветра значительно изменяются в зависимости от дальности, азимута и угла места даже в тех случаях, когда ошибки определения этих параметров остаются постоянными во времени. В то же время при использовании навигационных средств слежения ошибки измерения ветра обычно не изменяются слишком сильно при разных значениях дальности или высоты.

Неопределенности, обусловленные расчетом ветра вручную, были оценены в публикации ВМО (WMO, 1975). Был сделан вывод о том, что риск внесения существенных ошибок за счет использования ручных методов расчета ветра (таких как методы, предусматривающие применение планшетов, логарифмических линеек и прочее) слишком велик и что расчеты ветра на высотах следует автоматизировать в возможно большей степени.

Точность систем измерения ветра на высотах время от времени изменяется. Это изменение может происходить в короткие периоды времени в ходе конкретного полета мишени, когда слежение временно ухудшается, или в ходе всего запуска, например, в том случае, если сигналы, передаваемые с зонда, использующего навигационные средства, являются дефектными. В некоторых местах точность измерения ветра на высотах может постепенно уменьшаться со временем в течение нескольких месяцев в связи с нестабильностью работы системы слежения или с неправильной наладкой наземной системы. Во всех случаях было бы полезно рассчитывать оценки точности измерений ветра с помощью

систем измерения ветра на высотах в реальном масштабе времени для дополнения этой информацией сообщаемых данных измерений ветра на высотах. Информация об ошибках позволила бы выявлять результаты измерений более низкого качества, и при численном анализе им мог бы придаваться меньший вес. Сообщения об ошибках могли бы обеспечиваться на практике посредством использования соответствующих кодов TEMP или PILOT и таблиц BUFR (ВМО, 2011a).

Когда ошибки слежения за мишенью начинают приводить к неприемлемым ошибкам в результатах измерения ветра при конкретном вертикальном разрешении, то обычно приходится использовать меньшее вертикальное разрешение.

Практика ступенчатого уменьшения вертикального разрешения при измерениях ветра на высотах в верхней тропосфере и нижней стратосфере в основном принималась для преодоления ограничений по слежению, присущих радиотеодолитам. Такая практика не оправдана фактической вертикальной структурой атмосферы. Многие из наиболее значительных вертикальных сдвигов ветра обнаруживаются в верхних слоях струйных течений на высотах 10–18 км (см., например, вертикальные профили ветра, представленные в работе Nash, 1994).

13.5.1.2 **Ошибки определения высоты**

Ошибки определения высоты при радиовеетровом зондировании в тропосфере и нижней стратосфере будут такими же, как и ошибки при измерениях высоты, описанные в настоящем томе, глава 12. Эти ошибки будут самыми большими для радиозондов, в которых используются датчики давления в верхней стратосфере, и были бы самыми значительными для данных ЧПП или при климатических исследованиях при наличии значительного вертикального сдвига ветра как, например, в околполярном вихре (см. рисунок 13.1(b)).

При слежении за шаром-пилотом с использованием одного теодолита высота рассчитывается по времени нахождения шара в полете, а скорость подъема определяется предположительно. На практике запуск шара-пилота с точно определенной скоростью подъема является сложной задачей. Поэтому там, где имеется значительный вертикальный сдвиг ветра в нижних слоях, возможно связанный со значительными различиями в вертикальной скорости из-за термиков, ошибки определения высоты могут оказывать отрицательное воздействие на результаты шаропилотных наблюдений.

Опытная эксплуатация полностью автоматизированных систем измерения ветра на высотах часто показывает расхождения между временем, определенным для проведения наблюдений за ветром, и временем, установленным для связанных с ними радиозондовых измерений. В некоторых случаях начало измерений ветра не совпадает с началом радиозондовых измерений, в других – синхронизация нарушается в ходе полета по ряду причин. Время, установленное для сообщений о ветре, не всегда соответствует времени получения данных, используемых для расчета ветра, а скорее соответствует времени начала или завершения отбора данных. Все виды ошибок, связанных с согласованием по времени, могут приводить к серьезным ошибкам определения высоты, на которой производились измерения ветра. Такие ошибки должны быть устранены в ходе опытной эксплуатации, если целью является достижение надежного функционирования.

13.5.1.3 **Движение мишени по отношению к атмосфере**

Движение мишени относительно воздуха имеет наибольшее значение для систем, обладающих высокой точностью слежения и самым большим вертикальным разрешением. Например, раскачивание радиозонда ГСОМ под шаром-пилотом отчетливо прослеживается с помощью ГСОМ и должно отфильтровываться в возможно большей степени.

Ошибки, обусловленные движением шара-пилота относительно атмосферы, возникающим из-за распространения вихрей от спутного потока шара, могут достигать $1\text{--}2\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (уровень 2σ) при отслеживании небольших шаров-пилотов (массой 50 г) при вертикальном разрешении 50 м. В случае повседневных оперативных измерений (вертикальное разрешение около 300 м) при использовании шаров большего размера (массой более 350 г) ошибки, связанные с движением шара, меньше.

Горизонтальное движение зондов, сбрасываемых с парашютом относительно атмосферы, также может ограничить точность измерений сбрасываемыми зондами, слежение за которыми производится с помощью ГСОМ. Скорость спуска сбрасываемых зондов обычно вдвое больше скорости подъема оперативных шаров-радиозондов.

13.5.2 Ошибки при шаропилотных наблюдениях

Инструментальные погрешности хорошего оптического теодолита желательно не должны превышать $\pm 0,05^\circ$. Эти погрешности могут медленно изменяться с изменением азимута или угла места, но они невелики по сравнению с ошибками, которые вносятся наблюдателем. Погрешности шкал отсчета не должны превышать $0,1^\circ$. Значение этих погрешностей возрастает при большой дальности и при работе с малыми углами места.

При слежении за подъемом с помощью одного теодолита источником наибольших ошибок является неопределенность скорости подъема шара. Эта неопределенность возникает из-за различий в заполнении шара газом, формы шара и скорости вертикальных движений воздуха в атмосфере, в которой поднимается шар. Соответствующая ошибка определения скорости подъема дает в результате пропорциональную ошибку определения высоты, на которой находится шар, и, следовательно, с учетом изменения угла места, пропорциональную ошибку определения скорости ветра.

При отслеживании подъема с помощью двух теодолитов погрешности системы зависят от принятого метода оценки. Анализ погрешностей был представлен в работе Schaefer and Doswell (1978).

13.5.3 Ошибки систем, в которых используется направленная антенна

Связь между ошибками по вектору ветра и ошибками фактических измерений слежения может быть выражена как приближенная функция высоты и средней скорости ветра (или отношения последней к средней скорости подъема шара-зонда). Выражения для случайных ошибок при измерениях ветра с помощью первичных радиолокаторов и радиотеодолитов имеют следующий вид:

- а) для первичного или вторичного радиолокатора, измеряющих наклонную дальность, азимут и угол места:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_r^2 \cdot Q^2 / (Q^2 + 1) + \varepsilon_\theta^2 \cdot h^2 + \varepsilon_\phi^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] / \tau^2 \quad (13.3)$$

- б) для оптических теодолитов или радиотеодолитов и радиозондов, измеряющих азимут, угол места и высоту:

$$\varepsilon_v^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_h^2 \cdot Q^2 + \varepsilon_\theta^2 \cdot h^2 \cdot (Q^2 + 1)^2 + \varepsilon_\phi^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] / \tau^2 \quad (13.4)$$

где ε_v — векторная ошибка расчета ветра; ε_r — случайная ошибка измерения наклонной дальности; ε_θ — случайная ошибка измерения угла места; ε_ϕ — случайная ошибка измерения азимута; ε_h — случайная ошибка измерения высоты (рассчитанная по измеренному значению давления); Q — отношение величины среднего вектора ветра до высоты h к средней скорости подъема шара-зонда до высоты h ; τ — интервал времени между измерениями.

Таблица 13.2 демонстрирует различие точности определения вектора ветра с помощью указанных выше двух методов при измерении ветра на высотах. Средняя скорость

Таблица 13.2. 90 % векторная ошибка ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) как функция высоты и отношения Q среднего ветра к скорости подъема

Q	Радиолокатор						Радиотеодолит					
	ε_v 5 км	ε_v 10 км	ε_v 15 км	ε_v 20 км	ε_v 25 км	ε_v 30 км	ε_v 5 км	ε_v 10 км	ε_v 15 км	ε_v 20 км	ε_v 25 км	ε_v 30 км
1	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	1	1,5	3	5,5	9	25
2	1	1,5	2,5	3	4	4	5	4	6,5	11	19	49
3	1,5	2,5	3	4	5	6	4	7	11	19	30	76
5	1,5	3	5	6	8	10	9	18	27	42	59	131
7	2,5	5	7	9	11	13	18	34	51	72	100	194
10	3	6,5	10	13	16	19	34	67	100	139	182	310

Примечания:

- Данная таблица не включает дополнительные ошибки, вызванные многолучевой интерференцией при радиотеодолитных наблюдениях, которые возможны при значениях Q , равных 7–10.
- На практике радиотеодолитные ветровые наблюдения сглаживаются по большим по вертикали слоям, чем указано в этих расчетах, для всех высот за исключением 5 км. Таким образом, ошибки радиотеодолитов на высотах 15 км и более должны делиться на коэффициент, равный, по крайней мере, четырем для соответствия оперативной практике.

подъема, принимаемая при измерении ветра на высотах, обычно должна составлять 5–8 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. Значения ошибок вектора ветра рассчитываются по уравнениям (13.3) и (13.4) для различных высот и значений Q для системы слежения со следующими характеристиками: $\varepsilon_r = 20$ м; $\varepsilon_\theta = 0,1^\circ$; $\varepsilon_\phi = 0,1^\circ$; ε_h — ошибка измерения высоты, соответствующая ошибке определения давления, равной 1 гПа; $\tau = 1$ мин.

Из таблицы 13.2 видно, что точность измерения ветра с помощью радиотеодолита (или оптического теодолита) при заданной точности слежения, безусловно, меньше точности измерений с помощью первичных или вторичных радиолокаторов.

В выражениях для векторной ошибки рассчитанных значений ветра в уравнениях 13.3 и 13.4 первые два члена в квадратных скобках представляют собой радиальную ошибку и ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося с тем же азимутом, что и у следящей антенны. Третий член в квадратных скобках представляет собой тангенциальную ошибку — ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося под прямым углом к азимуту следящей антенны. Для этих типов систем измерения ветра на высотах распределение ошибок не является независимым от направлений и не может адекватно представляться одним параметром. Таким образом, значения в таблице 13.2 указывают размер ошибок, но не направление, в котором, они действуют.

Когда тангенциальные и радиальные ошибки очень сильно различаются по величине, распределение является в значительной степени эллиптическим, и совместные ошибки имеют тенденцию концентрироваться или параллельно оси следящей антенны, или перпендикулярно к этой оси. В таблице 13.3 приведены некоторые значения отношения тангенциальных ошибок к радиальным, которые совместно дают векторные ошибки, представленные в таблице 13.2. Значения более 3 в таблице 13.3 указывают на ситуации, когда доминирует компонент тангенциальной ошибки. Таким образом, при радиолокационном измерении ветра тангенциальные ошибки доминируют при больших расстояниях (высокие значения средней скорости ветра и, следовательно, высокие значения Q плюс самые большие высоты). При радиотеодолитном измерении ветра радиальные ошибки доминируют при больших расстояниях, и соотношения становятся гораздо меньше единицы. Ошибки по углу места вносят существенный вклад в радиальные ошибки радиотеодолитов. Однако случайные ошибки определения высоты радиозонда вносят наиболее значительный вклад на больших высотах, когда значения Q малы.

Таблица 13.3. Соотношение компонентов ошибок при измерении ветра на высотах
 $(\alpha_{\varepsilon V} = \text{равно отношению тангенциальной ошибки к радиальной } \alpha)$

Q	Радиолокатор						Радиотеодолит					
	$\alpha_{\varepsilon V}$ 5 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 10 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 15 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 20 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 25 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 30 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 5 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 10 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 15 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 20 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 25 км	$\alpha_{\varepsilon V}$ 30 км
1	1/2	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/3	1/4	1/5	1/13
2	1	1	2	2	2	2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1/13
3	1	2	2	3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/5	1/6	1/13
5	1	3	4	4	5	5	1/5	1/5	1/6	1/6	1/7	1/14
7	3	5	5	6	6	7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/14
10	4	7	8	9	9	9	1/10	1/10	1/10	1/11	1/11	1/16

Результаты, приведенные в таблицах 13.2 и 13.3, основаны на теоретической оценке ошибок по различным видам систем. Однако предполагается, что ветер рассчитывается просто по разности между данными двух дискретных отсчетов слежения. При этом не принимается во внимание возможность повышения точности за счет вычисления скорости изменения местоположения по большому объему информации по слежению при высоком временном разрешении. В таблице 13.4 содержатся оценки точности фактических измерений, полученные по ряду радиолокаторов и радиотеодолитов в ходе четырех фаз международных сравнений радиозондов ВМО (см. 13.6.1.2 с информацией по тестам).

Из трех радиотеодолитов, тестируемых в ходе международных сравнений радиозондов ВМО, японская система наилучшим образом зарекомендовала себя при высоких значениях Q , но позже этой системой для измерения угла превышения в большом объеме использовалось сглаживание, и точность измерения скорости вертикальных движений в верхних слоях струйных течений была недостаточно высокой. Для портативного радиотеодолита меньшего размера, установленного США в Японии, характерны самые большие ошибки измерения ветра при высоких значениях Q в связи с проблемами, обусловленными многолучевой интерференцией.

Эллиптичность распределения ошибок радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений продемонстрировала тенденции, предсказанные для высоких значений Q . Однако эллиптичность была не столь высокой, как указано в таблице 13.3, вероятно, в связи с тем, что случайные ошибки скорости изменения азимута и угла превышения, полученные на практике, были меньше принятых для таблицы 13.3.

В ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, (WMO, 2011b) Китай использовал современный вторичный радиолокатор, работающий на частоте 1 680 МГц с системой радиозондов «Дацяо». При сильном ветре в нижней тропосфере значения Q на высоте около 4 км составляли от двух до трех; дальность — около 15 км, а среднеквадратическая векторная ошибка ($k = 2$) измерений ветра — от 1 до 1,2 м·с⁻¹ при эллиптичности от 1 до 1,3. К концу полетов в стратосфере Q вновь стало равным в среднем примерно 2,5, но при большей дальности (от 70 до 100 км) значение ε_v для $k = 2$ составляло около 2,7 м·с⁻¹, а эллиптичность была равна двум. За эталонный ветер в Янцзяне был принят ветер, измеренный по ГСОМ с высоким вертикальным разрешением более 150 м, тогда как в Казахстане вертикальное разрешение рабочего эталона не превышало 300 м. Таким образом, современный китайский вторичный радиолокатор показал хорошие результаты и является существенным продвижением по сравнению с предыдущей системой, работающей на частоте 403 МГц.

Таблица 13.4. Оценки типичных случайных векторных ошибок (уровень 2σ , единица: $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) при измерениях ветра на высотах, полученные в ходе сравнений радиозондов ВМО (включаются оценки типичных значений Q и α_v для каждой из четырех фаз)

Система	ε_v 3 км	α_{ev} 3 км	Q 3 км	ε_v 18 км	α_{ev} 18 км	Q 18 км	ε_v 28 км	α_{ev} 28 км	Q 28 м	Место испытания
Первичный радиолокатор (Соединенное Королевство)	1,1	1	3,5	2,1	1,3	5	2,7	1,6	5	Соединенное Королевство ^а
Радиотеодолит (Соединенные Штаты Америки)	2,1	≈ 1	1,5	4,8	≈ 1	2,5	5,2	≈ 1	1	Соединенное Королевство
Радиотеодолит (Соединенные Штаты Америки)	2,8	≈ 1	2,5	10,4	0,4	6	9	0,33	4	Соединенные Штаты Америки
Портативный радиотеодолит	1,5	≈ 1	< 1	4,8	≈ 1	3	5,8	≈ 1	1,5	Казахстан
Портативный радиотеодолит	2,2	≈ 1	1,5	12	0,31	5,5	9	0,23	4	Япония
Радиотеодолит (Япония)	1,7	≈ 1	1,5	6,4	0,48	5,5	4,7	0,48	4	Япония
Вторичный радиолокатор (АВК, Россия)	1,5	≈ 1	< 1	2,6	≈ 1	3	2,6	≈ 1	1,5	Казахстан
Вторичный радиолокатор (Китай)	1,5	≈ 1	< 1	3,8	≈ 1	3	3,4	≈ 1	1,5	Казахстан

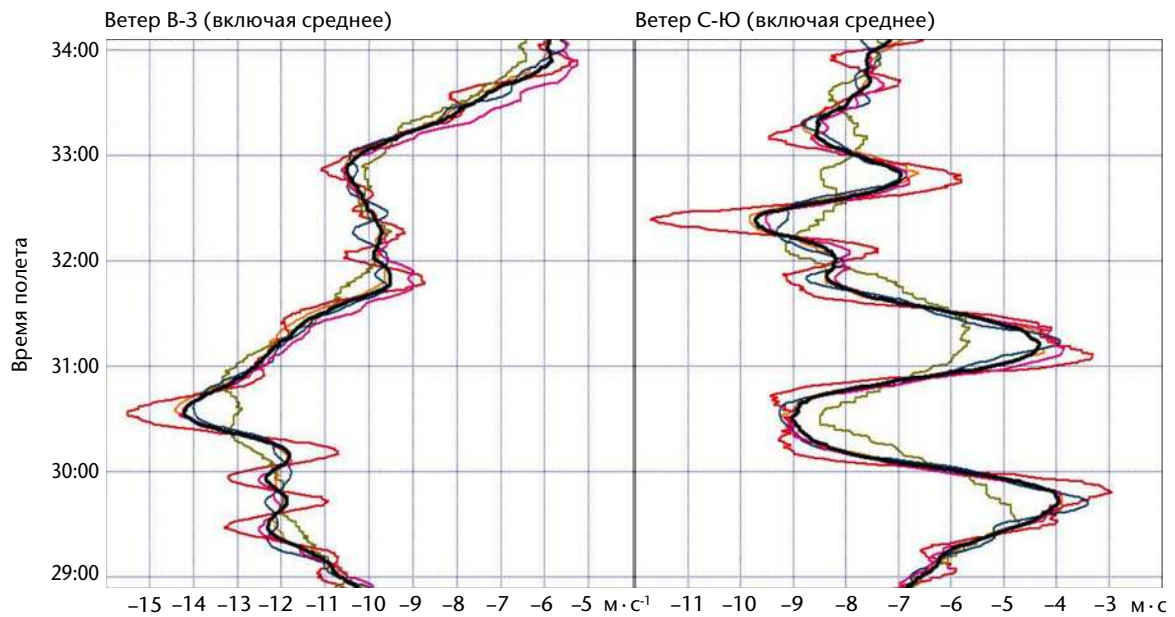
Примечание:

а Данные, полученные в ходе испытаний в Соединенном Королевстве после фазы I международного сравнения радиозондов ВМО (см. Edge et al., 1986).

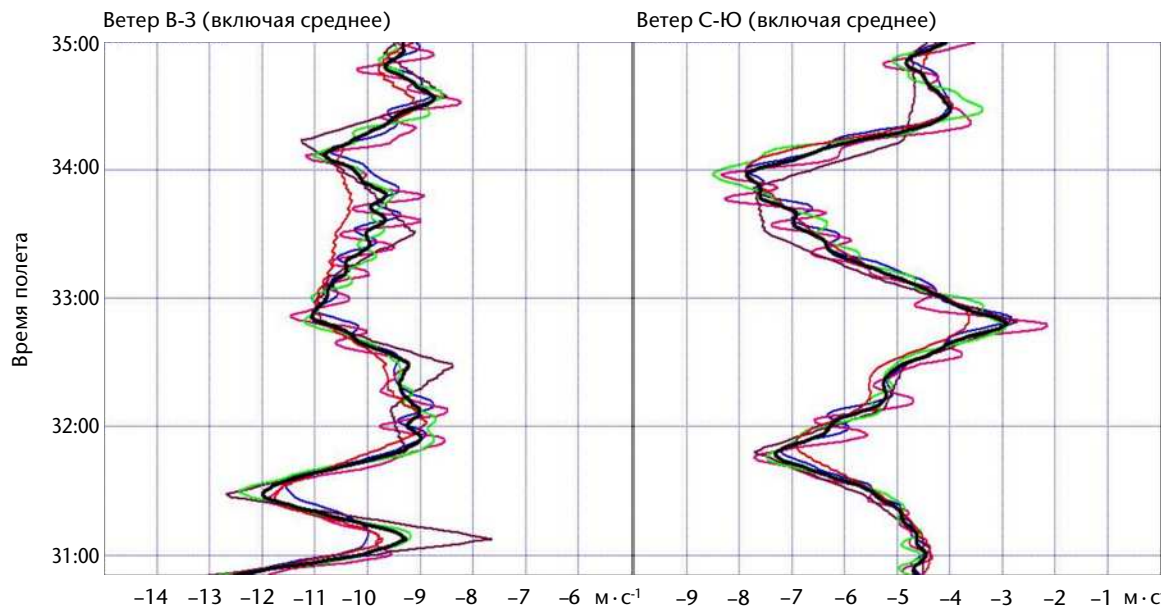
13.5.4 Ошибки систем для измерения ветра, использующих Глобальную систему определения местоположения

Теоретически система обнаружения ветра ГСОМ, использующая коды дальности грубого разрешения в дифференциальном режиме, должна обладать возможностью измерения ветра с неопределенностью $0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Оценки точности, приведенные в таблице 13.5, были сделаны на основе недавно проведенных ВМО тестов радиозондов ГСОМ. Основное различие между системами заключается в различной фильтрации, применяемой в отношении ветра для устранения движения радиозонда по отношению к шару-зонду. Это движение складывается из регулярного маятникового движения радиозонда под шаром-зондом и дополнительного неоднородного вращения и перемещения вследствие того, что на шар и радиозонд действуют разные ветры по ходу подъема шара-зонда.

Примеры одновременных измерений ветра в верхней тропосфере, производившихся с помощью радиозондов ГСОМ в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО, приведены на рисунке 13.2. На рисунке приведены только выборки полетов, поскольку различия можно увидеть лишь при рассмотрении небольших выборок данных, так как общее совпадение результатов значительно выше по сравнению со стандартами, предусмотренными для более ранних измерений параметров ветра.



а) Полет 33: Цзинья, ИнтерМет, Локхид Мартин – Сиппикан, МОДЕМ и Вайсала



б) Полет 34: Чанфэн, Грав, Хуаюнь, Мейсей и Метеолабор

Рисунок 13.2. Выборка результатов взаимного сравнения измерений параметров ветра с помощью ГСОМ, проводившихся в Янцзяне, Китай, в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО (WMO, 2011b).

Выборки, представленные на рисунке 13.2, демонстрируют довольно хорошую согласованность определения вертикальной структуры почти всеми системами при пиках волн, отделенных интервалом примерно в 90 секунд, хотя и не такую хорошую, как для колебаний при пиках, отделенных интервалом в 40 секунд и меньше. Таким образом, длины вертикальных волн, в основном отображаемых однозначно, составляют 600 м, а длины волн, отображаемых со значительной неоднозначностью, — 200 м и менее. График одной из систем на рисунке 13.2(а) слишком сглажен по сравнению с графиками других, а один из графиков на рисунке 13.2(б) стремится к аппроксимации прямой линейной измерений с помощью ГСОМ. В обоих случаях это ведет к появлению значений, резко отклоняющихся от корректных величин.

Таблица 13.5. Случайная векторная ошибка ($k = 2$) и систематическая ошибка высококачественных навигационных систем определения ветра с помощью ГСОМ, полученные в ходе проведенного под эгидой ВМО в Янцзяне, Китай, взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов

Диапазон высот	Систематическая ошибка, ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)	Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 2 км, ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)	Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 300 м, ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)	Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 100 м, ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$)
Нижняя тропосфера 0–8 км	до $\pm 0,05$	0,06–0,15	0,12–0,50	0,3–0,7
Верхняя тропосфера 8–17 км	до $\pm 0,10$	0,1–0,4 ^a	0,3–0,9 ^a	0,4–1,4 ^a
Стратосфера 17–34 км	до $\pm 0,15$	0,15–0,40 ^b	0,3–0,8 ^b	0,4–1,1 ^b

Примечания:

^a Худший результат на высоте около 16 км

^b Худший результат на высоте более 28 км

Данные выборки, иллюстрирующие не самые лучшие, но и не самые худшие результаты, показывают относительно высокое качество обработки измерений ветра с помощью ГСОМ, а также то, что большое количество производителей достигли удовлетворительных результатов. Это подтверждается данными статистической обработки 60 полетов оперативных радиозондов ГСОМ в Янцзяне (см. таблицу 13.5). В этой таблице представлены данные о ветре, полученные по результатам примерно 30 сравнительных полетов, осредненные по двухминутным, тридцати- и десятисекундным интервалам, и показано, что лучшими показателями обладают системы с наименьшей среднеквадратической разностью векторов ветра. Ошибки, представленные в таблице 13.5, достаточно малы для того, чтобы удовлетворить потребности пользователей в точности измерений ветра, описанных в настоящем томе, глава 12, приложение 12.А.

Со временем различия в отфильтрованных результатах определения местоположения по ГСОМ для сведения к минимуму влияния движений радиозонда по отношению к шару-зонду, вероятно, будут уменьшаться по сравнению с диапазонами, указанными в таблице 13.5. Однако нерегулярные движения (в отличие от относительно сглаженных маятниковых движений) радиозонда по отношению к шару-зонду будут ограничивать согласованность измерений двух радиозондов, которые могут быть получены в ходе одного полета. По этой же причине можно ожидать, что ошибки измерений по отдельному радиозонду будут выше расчетных при ожидаемой точности определения положения радиозонда по спутниковым навигационным системам.

В Китае внешняя оболочка шаров-зондов с двойной оболочкой часто разрывалась на высоте около 16 км, в результате чего помехи стабильному передвижению радиозонда могли привести к самым высоким среднеквадратическим векторным ошибкам на высоте около 16 км, представленным в таблице 13.5. Результаты тестов (60 полетов) двух радиозондов ГСОМ различных производителей для нижней тропосферы и стратосферы, проходивших в Соединенном Королевстве в течение нескольких сезонов 2009/2010 гг., сходны с результатами тестирования тех же радиозондов в Янцзяне, представленными в таблице 13.5. Однако СКО вектора ветра в верхней тропосфере находится в пределах $0,3\text{--}0,6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при вертикальном разрешении 100 м и $0,2\text{--}0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при вертикальном разрешении 300 м. Таким образом, для этих двух систем результаты измерений с более высоким разрешением в верхней тропосфере, проходившие в Соединенном Королевстве, соответствовали друг другу гораздо лучше, чем результаты измерений в Янцзяне.

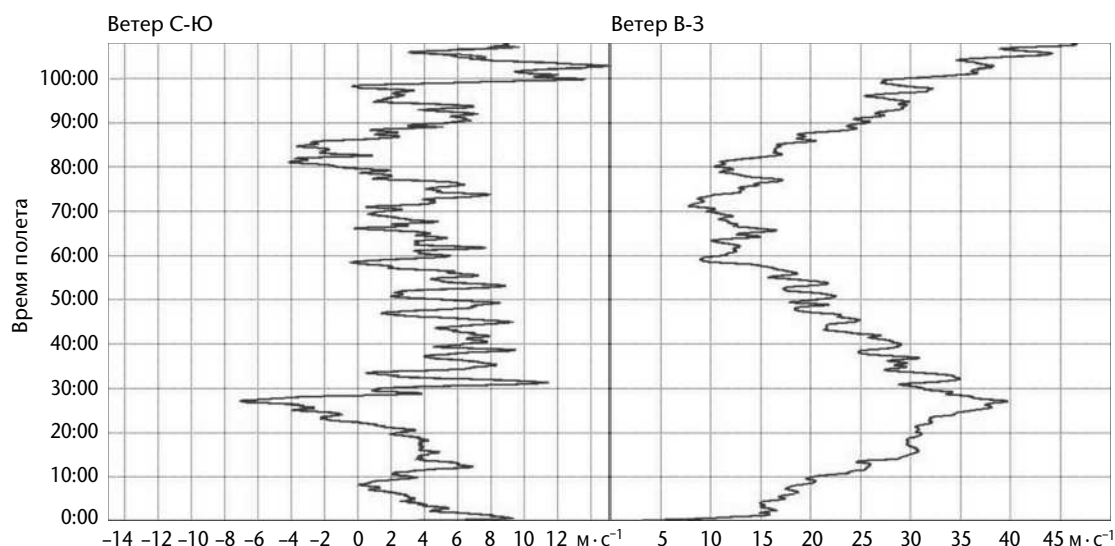


Рисунок 13.3. Примеры вертикальных профилей ветра, полученных независимо при помощи радиозондов ГСОМ двух различных производителей в Камборне, Соединенное Королевство, демонстрирующие мелкомасштабную структуру, присутствующую во многих корректных измерениях. Программное обеспечение обработки результатов измерений радиозонда должно указывать, на каких этапах полета получены менее надежные результаты в случае, когда ухудшается прием сигналов ГСОМ.

Иногда радиозонд ГСОМ дает сбой и не передает данные о ветре в ходе полета, продолжая передавать данные о температуре и влажности до момента разрыва оболочки. Радиочастотные помехи внешних источников вызывают проблемы и увеличивают ошибки результатов измерений ветра. Программное обеспечение обработки результатов должно иметь возможность информировать оператора о таких проблемах, поскольку трудно бывает отличить реальную структуру атмосферы и измерения с большими случайными ошибками (например, см. профили ветра на рисунке 13.3).

В отличие от наземных систем «Лоран-С», результаты измерений ветра по ГСОМ не изменяются значительным образом в зависимости от условий в ионосфере.

13.5.5 Ошибки наземных радионавигационных систем «Лоран-С»

Ошибки навигационной системы зависят от фазовой стабильности сигналов системы, принимаемых радиозондом, и от положения радиозонда по отношению к сети передатчиков навигационной системы. Однако нельзя при этом игнорировать качество телеметрической линии связи между радиозондом и наземным приемником. В тестах, в которых радиозонды перемещались на большие расстояния (по крайней мере, на 50–100 км), было обнаружено, что ошибки измерения ветра, характерные для навигационных систем измерения ветра, возрастают с увеличением расстояния, однако обычно в той же или в меньшей степени, что и ошибки при такой же дальности в случае использования первичного радиолокатора. Прием сигнала с радиозонда сразу же после запуска не всегда бывает надежным. Ошибки измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» сразу же после запуска больше, чем при уже установившемся движении радиозонда через несколько минут после запуска.

Точность навигационных измерений ветра системой «Лоран-С» ограничена, главным образом, соотношением сигнал-шум сигналов, принимаемых радиозондом. Используемое на практике для получения надежных данных о ветре время осреднения составляет от 30 с до 2 мин для сигналов «Лоран-С». Мощность сигналов, принимаемых в данном месте от некоторых передатчиков «Лоран-С», может значительно колебаться в течение

дня. Обычно это связано с тем, что в определенных ситуациях суточные колебания высоты и ориентации ионосферных слоев оказывают сильное влияние на мощность сигнала. Колебания мощности и устойчивости сигнала могут быть настолько велики, что успешные измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» могут быть невозможны в течение всего дня.

Другим важным фактором, влияющим на точность измерений с помощью системы «Лоран-С», является геометрическое уменьшение точности навигационной системы, которое зависит от местоположения радиоприемника зонда по отношению к передатчикам системы. Когда радиозонд находится поблизости от центра базисной линии между двумя передатчиками, то соответствующая случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов от двух передатчиков даст в результате небольшую случайную ошибку определения местоположения в направлении, параллельном базисной линии между передатчиками. Однако та же случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов приведет к очень большой ошибке определения местоположения в том же направлении, если радиозонд находится на продолжении базисной линии одного из передатчиков. Для обеспечения самой высокой точности двумерного измерения горизонтального ветра требуются, по крайней мере, две пары навигационных передатчиков, расположенных таким образом, чтобы их базисные линии находились приблизительно под прямым углом, а радиозонд при этом перемещался к центру треугольника, образованного тремя передатчиками. На практике во всех случаях, когда это возможно, используются сигналы с более чем двух пар навигационных передатчиков для повышения точности ветровых наблюдений. Использование метода наименьших квадратов для определения согласованности полученных данных измерений ветра весьма полезно при определении оценок ошибок измерения ветра.

Помехи, препятствующие распространению сигналов сети навигационных передатчиков, являются еще одним источником ошибок.

Passi и Morel (1987) провели первое исследование ошибок измерений ветра с помощью системы «Лоран-С». Имеющиеся в продаже системы могли обеспечивать хорошее качество данных об измерении ветра (таблица 13.6). Качество измерений, полученных при работе, главным образом, с сигналами в виде приземной волны, было рассчитано по тестам установки на Британских островах, как сообщалось в работе Nash and Oakley (1992). Качество измерений, получаемых при работе с передатчиками на большем расстоянии, когда существенное значение имеют пространственные волны, оценивалось по результатам фазы IV международных сравнений радиозондов ВМО в Японии (см. WMO, 1996). В Соединенном Королевстве измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» были прекращены из-за неопределенности будущего применения этой системы в северо-западной части Европы и заменены на системы измерения параметров ветра с помощью ГСОМ на всех оперативных пунктах.

13.5.6 Ошибки репрезентативности

При проведении большинства современных радиоветровых измерений фиксируют мелкомасштабные колебания параметров ветра в атмосфере, которые не могут быть представлены в моделях ЧПП. Поэтому, например, когда профили составляющих ветра,

Таблица 13.6. Ожидаемая случайная ошибка ($k = 2$) и систематическая ошибка для навигационных систем обнаружения ветра «Лоран-С» в районах, где охват близок к оптимальному

Система	Время осреднения (с)	Систематическая ошибка ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)	Случайная ошибка ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)
«Лоран-С» (приземная волна)	30–60	до $\pm 0,2$	0,6–3
«Лоран-С» (пространственная волна)	60–120	до $\pm 0,2$	1,6–4

полученные с помощью ГСОМ, сравнивают непосредственно с результатами численного моделирования, полученными с помощью глобальных моделей, стандартное отклонение данных наблюдений/результатов численного моделирования ($k = 2$) для средних широт обычно составляет от 4 до 6 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ в нижней тропосфере и от 4 до 9 $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ в верхней тропосфере, то есть оно всегда значительно больше инструментальных векторных ошибок, указанных в таблице 13.5, для вертикального разрешения 300 м. Частично это расхождение является результатом низкой точности сообщаемых данных о ветре, как отмечалось ранее в 13.1.3.2.

Среднеквадратические значения (СКЗ) разности векторов между радиозондовыми измерениями ветра на высотах, проводимыми с интервалами в 2, 6, 18 и 54 ч, были рассчитаны на основе использования временных рядов данных измерений, проводившихся в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, (WMO, 2011b) с применением методики, использованной Kitchen (1989). Результаты представлены в виде функции высоты на рисунке 13.4.

Затем можно ожидать, что СКЗ ошибки вектора в ветре будет связано с разделением по времени, используя соотношения из работы Kitchen (1989):

$$(\tau_v(\Delta t))^2 = (b_v \Delta t^\gamma)^2 + (\tau_{v(\text{small scale})}(\Delta t))^2 \quad (13.5)$$

где $\tau_v(\Delta t)$ — СКЗ разности векторов ветра по измерениям, произведенным с интервалом Δt ; $b_v \Delta t^\gamma$ — структурная функция, представляющая СКЗ отклонения, связанного с изменениями во времени синоптического масштаба и мезомасштаба; b_v — постоянная; γ — постоянная. В ходе проведения измерений в Янцзяне величина γ составляла от 0,5 до 0,6 для измерений ветра в тропосфере с интервалами времени между 6 и 54 ч. Наконец, $\tau_{v(\text{small scale})}(\Delta t)$ — СКЗ разности векторов на высотах, связанной с мелкомасштабными структурами, такими как квазиинерционные гравитационные волны, турбулентные слои и структуры облачного масштаба.

В ходе измерений в тропосфере в Янцзяне СКЗ разности векторов ветра, обусловленной мелкомасштабными структурами, составляло примерно $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \pm 0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а СКЗ

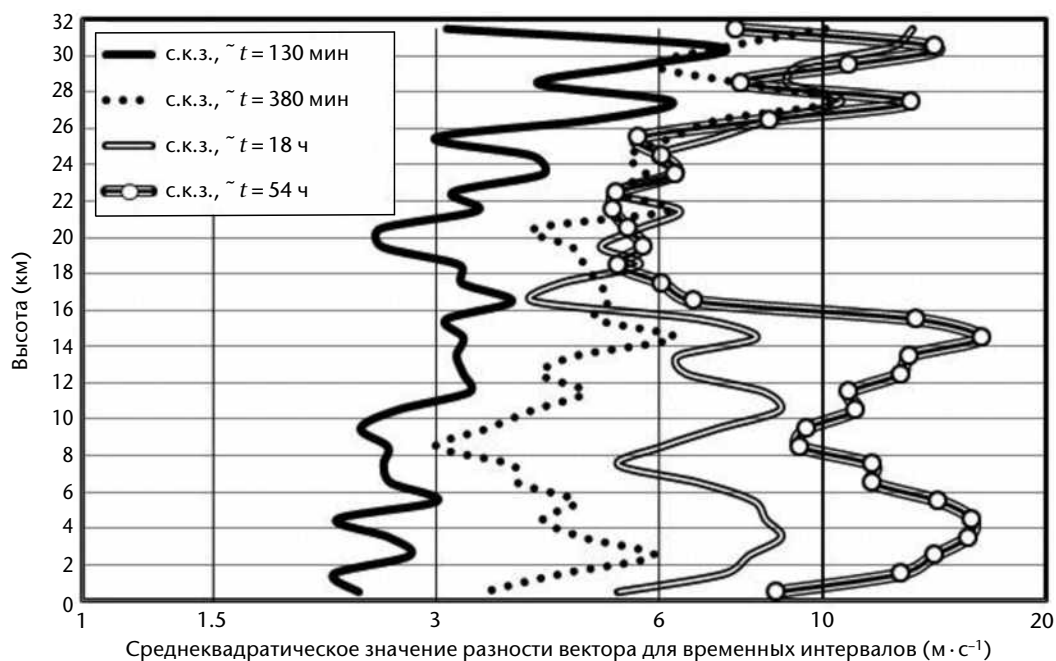


Рисунок 13.4. СКЗ разности векторов ветра ($k = 1$) для временных интервалов 2, 6, 18 и 54 ч для 11 парных наблюдений с вертикальным разрешением 1 км, по данным взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, июль 2010 г. Влияние инструментальной ошибки было исключено из среднеквадратической разности.

разности векторов ветра, обусловленной структурами синоптического масштаба и мезомасштаба — от 2 до 3 м·с⁻¹ для интервала времени 2 часа, увеличиваясь до 7 м·с⁻¹ для интервала времени 18 часов. Это величины примерно одного порядка с теми, которые получил Kitchen (1989) при измерениях в нижней и средней тропосфере в Соединенном Королевстве. Здесь СКЗ разности векторов ветра были больше в верхней тропосфере из-за колебаний синоптического масштаба, связанных со струйными течениями в средних широтах. Хотя можно было бы ожидать, что среднеквадратическая разность векторов, обусловленная явлениями синоптического масштаба и мезомасштаба, уменьшится до менее 1 м·с⁻¹ при интервале времени 40 минут в ходе измерений в Янцзяне, отсутствует информация о временных интервалах, необходимых для уменьшения СКЗ разности вектора ветра, обусловленного мелкомасштабными структурами, до величины менее 1 м·с⁻¹. Вот почему для получения хорошей согласованности результатов измерений ветра или для того, чтобы результаты измерений с высокой точностью отражали состояние атмосферы в определенный момент времени, измерения необходимо проводить с интервалом времени намного меньше, чем 20 мин, как указано в 13.1.3.3.

В Янцзяне мелкомасштабные колебания, связанные с квазиинерционными гравитационными волнами, стали доминирующим фактором в изменении СКЗ разности векторов со временем, и структурная функция не подходит для использования в случае временных изменений мезомасштаба и синоптического масштаба. Такие же данные были получены Китченом в летний период в Соединенном Королевстве. СКЗ разности векторов при интервале времени в 18 часов в Янцзяне находилось в диапазоне от 5 до 9 м·с⁻¹ — величины того же порядка, что и величины, полученные в ходе измерений в Соединенном Королевстве.

Таким образом, на ошибки репрезентативности при измерениях ветра будут оказывать основное влияние мелкомасштабные изменения, а изменения синоптического масштаба и мезомасштаба будут, вероятнее всего, иметь значение в связи со структурами, которые обнаруживаются в струйных течениях в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В результате будут наблюдаться расхождения в данных измерений, полученных на разных пунктах, а описанные здесь величины отражают лишь условия и синоптическую ситуацию одного из типов местности, причем эти измерения включают измерения, сделанные во время надвигавшихся и отступавших от этого района тайфунов.

13.6 СРАВНЕНИЯ, КАЛИБРОВКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

13.6.1 Сравнение

Системы для измерения ветра на высотах, как правило, достаточно сложны, поэтому возможны различного рода отказы. Вполне вероятно, что такая система при частичном отказе может продолжать выдавать данные о вертикальной структуре ветра, которые операторам могут показаться правдоподобными. Многие из этих систем требуют тщательной отладки и технического обслуживания для поддержания точности слежения.

Точность измерений ветра оперативными системами может быть проверена путем сравнения их со статистикой мониторинга наблюдений, выпускающей центрами ЧПП. Статистика мониторинга включает сводки различий между измерениями ветра на высотах по каждому месту и краткосрочными прогнозами полей (фоновых) для того же места. При существующих в настоящее время методах усвоения и анализа данных ошибка в наблюдениях оказывает некоторое влияние на поля метеорологического анализа. Таким образом, было продемонстрировано, что ошибки наблюдений наиболее надежно обнаруживаются посредством использования краткосрочного прогноза по результатам анализа, подготовленного за 6 часов до времени наблюдения.

Эксплуатационные характеристики систем измерения ветра на высотах могут также сравниваться с характеристиками других систем, качество измерений которых известно в ходе специальных тестов. Эти тесты могут дать возможность отследить ошибки, которые должны быть оценены независимо от ошибок оценки высоты.

Оба вида сравнений могут быть интерпретированы с помощью статистических методов, предложенных в публикации ВМО (WMO, 1989).

13.6.1.1 **Оперативный мониторинг посредством сравнения с прогностическими полями**

Статистические данные ежедневных сравнений результатов оперативных измерений ветра и полей краткосрочных прогнозов, полученных с использованием моделей ЧПП, могут предоставляться операторам систем через ведущие центры, назначенные КОС ВМО.

Интерпретация статистики мониторинга ветра на высотах является непростой задачей. Значения случайных ошибок в прогностических полях имеют такой же порядок или даже больше ошибок, полученных при использовании систем для измерения ветра на высотах, если они функционируют нормально. Ошибки прогнозов изменяются в зависимости от географического положения, и поэтому могут потребоваться указания центра ЧПП по их интерпретации. Однако относительно легко определить те системы измерения ветра на высотах, для которых случайные ошибки значительно превышают обычные значения. В последние годы около 6 % систем измерения ветра на высотах глобальной сети были определены как дефектные. В основном системы с дефектами функционирования были представлены радиотеодолитами и системами вторичных радиолокаторов.

Сводки систематических отклонений результатов наблюдений от прогностических полей за несколько месяцев или за весь год также полезны для выявления систематических ошибок определения скорости и направления ветра с помощью данной системы. Довольно распространенным дефектом является небольшое рассогласование следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов.

13.6.1.2 **Сравнение с другими системами измерения ветра**

Специальные сравнительные тесты систем измерения ветра на высотах позволили получить большое количество информации о фактических эксплуатационных качествах различных систем для измерения ветра на высотах, используемых по всему земному шару. В этих тестах ряд мишеней подвешивали к одному шару и отслеживали одновременно рядом наземных систем. Время получения сообщений о ветре с различных наземных станций синхронизировалось с точностью менее 1 с. Затем результаты измерения ветра могли сравниваться как функция времени полета мишени, а определенные для ветра высоты также могли сравниваться независимо. Интерпретация результатов сравнений становится более надежной, если, по крайней мере, одна из систем измерения ветра на высотах обеспечивает измерение ветра с высокой точностью и с известными характеристиками ошибок.

Всеобъемлющие серии сравнительных тестов были проведены в период 1984–1993 гг. как часть международных сравнений радиозондов ВМО. Фазы I и II этих тестов были проведены в Соединенном Королевстве и США соответственно (WMO, 1987). Фаза III была проведена Российской Федерацией в Казахстане (WMO, 1991), а фаза V прошла в Японии (WMO, 1996). Последующие сравнительные тесты, проходившие в Бразилии в 2001 г. (WMO, 2006a), были направлены конкретно на выявление проблем определения параметров ветра с помощью ГСОМ в тропиках, в результате чего системы радиозондов, использующие ГСОМ, были усовершенствованы и позднее также протестированы на Маврикии в 2005 г. (WMO, 2006b) и самым всесторонним образом в Янцзяне, Китай, в 2010 г. (WMO, 2011b).

Информация, приведенная в таблицах 13.4, 13.5 и 13.6, основана, прежде всего, на результатах международных сравнений радиозондов ВМО и дополнительных тестах, выполнявшихся в соответствии с теми же стандартами, что и тесты ВМО.

Теперь, когда разработка систем обнаружения ветра с помощью ГСОМ идет полным ходом, большинство этих систем можно использовать в качестве надежных транспортируемых эталонов для сравнительных тестов оборудования для измерений ветра на высотах в более отдаленных районах земного шара.

13.6.2 Калибровка

Калибровка наклонной дальности для радиолокаторов, в которых используются отраженные радиолокационные сигналы, должна проверяться по отдаленным объектам, местоположение которых точно известно. Подобным же образом следует осуществлять поверку азимута.

Ориентация следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов должна проверяться регулярно посредством сравнений отсчетов по ним с результатами, полученными с помощью оптического теодолита. Если средняя разность по углу места при наблюдении по теодолиту и радиолокатору составляет больше $0,1^\circ$, то необходимо проверить регулировку следящей антенны. Когда при поверке определения азимута используется компас, направление на северный магнитный полюс необходимо точно приводить к направлению на географический север.

При использовании навигационных систем важно проверить, точно ли зарегистрировано в компьютере местоположение наземной системы. Навигационная система слежения должна иметь правильную конфигурацию в соответствии с инструкциями изготовителя и должна стабильно работать еще до запуска радиозонда.

13.6.3 Техническое обслуживание

Радиотеодолиты и радиолокаторы представляют собой относительно сложное оборудование, и обычно для проведения их технического обслуживания требуется опытный техник. Такой техник должен проводить техническое обслуживание как электрической, так и механической части, а также проверить выполнение задач по ремонту. Уровень требуемой квалификации и частота технического обслуживания различаются в зависимости от конструкции системы. В конструкциях некоторых современных радиотеодолитов предусмотрена более высокая по сравнению с предшествующими конструкциями надежность механической части. Стоимость и возможности в отношении обеспечения технического обслуживания должны рассматриваться в качестве важных факторов при выборе типа системы для измерения ветра на высотах.

В большинстве современных навигационных систем слежения ремонт в связи с отказами в электрической части производится посредством замены дефектных модулей. Такие модули должны включать, например, приемники радиозондов или навигационные системы слежения. Как правило, в наземной навигационной системе отсутствуют движущиеся части, и техническое обслуживание механической части является незначительным, однако системы антенн, кабели и соединения следует регулярно inspectировать на предмет коррозии и других изменений, связанных с атмосферным воздействием. Расходы на техническое обслуживание могут быть минимальными при условии, если вместе с системой закупается достаточное число запасных модулей.

13.7 ПОПРАВКИ

Когда радиоветровые наблюдения производятся с помощью радиолокационной системы, то радиолокационная информация по слежению используется для расчета высоты, к которой привязываются измерения ветра. Эти радиолокационные высоты следует скорректировать на кривизну Земли, используя следующее уравнение:

$$\Delta z_{\text{curvature}} = 0,5(r_s \cdot \cos \theta)^2 / (R_c + r_s \sin \theta) \quad (13.6)$$

где r_s — наклонная дальность до мишени; θ — угол места мишени; R_c — радиус кривизны Земли в месте расположения наземной станции.

Кроме того, направление распространения луча радиолокатора изменяется, поскольку показатель преломления воздуха в среднем уменьшается с высотой, так как температура и количество водяного пара также уменьшаются с высотой. Изменения показателя преломления являются причиной искривления радиолокационного луча в направлении Земли. Таким образом, атмосферная рефракция обычно приводит к тому, что угол места мишени, наблюдаемый радиолокатором, превышает ее истинное геометрическое возвышение.

Типичные значения поправок на рефракцию $\Delta z_{\text{refraction}}$ представлены в таблице 13.7. Они были рассчитаны в работе Ноорег (1986). В связи с увеличением в последнее время возможностей по обработке данных на компьютерной технике, доступной для наземной станции, алгоритмы для расчета поправок на коэффициент рефракции легче использовать для радиолокаторов, обладающих высокой точностью слежения. Поправки, приведенные в таблице 13.7, были рассчитаны по осредненным за 5 лет климатологическим значениям температуры и содержания водяного пара для различных мест. В те дни, когда ошибки, обусловленные рефракцией, максимальны, требуемая поправка в некоторых местах может превышать приведенные в таблице 13.7 климатологические средние значения. Разница может достигать до 30 %.

Таблица 13.7. Примеры поправок на кривизну Земли и рефракцию к значениям высоты, полученным с помощью радиолокатора

Дальность по горизонтали (км)	Высота (км)	$\Delta z_{\text{curvature}}$	$\Delta z_{\text{refraction}}$ 60° с. ш. 01° з. д.	$\Delta z_{\text{refraction}}$ 36° с. ш. 14° в. д.	$\Delta z_{\text{refraction}}$ 1° ю. ш. 73° в. д.
25	10	49	–9	–10	–12
50	15	196	–31	–34	–39
100	20	783	–106	–117	–133
150	25	1 760	–211	–231	–262
200	30	3 126	–334	–363	–427

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Всемирная метеорологическая организация, 2010 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.
- , 2011a (обновлено в 2018 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I. Женева.
- Acheson, D.T., 1970: *LORAN-C Windfinding Capabilities: Wallops Island Experiments*. United States Department of Commerce, Weather Bureau. ESSA Technical Memorandum WBTM EDL 11.
- de Boor, C., 1978: *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, New York.
- Edge, P., M. Kitchen, J. Harding and J. Stancombe, 1986: *The Reproducibility of RS3 Radiosonde and Cossor WF Mk IV Radar Measurements*. Meteorological Office, Bracknell, OSM No. 35.
- Hooper, A.H., 1986: *The Calculation of Radio-wave Refraction, with Special Reference to Data Height-finding Radars*. Meteorological Office, Bracknell, OSM No. 17.
- Kaisti, K., 1995: New low-cost GPS solution for upper-air windfinding. *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina (27–31 March 1995). American Meteorological Society, pp. 16–20.
- Karhunen, P., 1983: Automated windfinding developments. *Preprints of the Fifth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11–15 April 1983), pp. 110–115.
- Kitchen, M., 1989: Representativeness errors for radiosonde observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115:673–700.
- Lange, A.A., 1988: A high-pass filter for optimum calibration of observing systems with applications. In: *Simulation and Optimization of Large Systems* (A.J. Osiadacz, ed.). Clarendon Press, Oxford, pp. 311–327.
- Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, 12:691–710.
- Nash, J. and T.J. Oakley, 1992: Experience in the use of LORAN-C windfinding in the United Kingdom. *Proceedings of the Twenty-first Annual Technical Symposium*, Wild Goose Association, Birmingham, England, pp. 81–88.
- Passi, R.M., 1978: Overdetermined windfinding systems. *Atmospheric Technology*, 10:65–75.
- Passi, R.M. and C. Morel, 1987: Wind errors using the worldwide LORAN network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4:690–700.
- Schaefer, J.T. and C.A. Doswell, 1978: The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 17:911–915.
- World Meteorological Organization, 1975: *Upper-air Sounding Studies* (R.E. Vockeroth). Technical Note No. 140 (WMO-No. 394), Volume II. Geneva.
- , 1985: *Meteorological Observations Using Navaid Methods* (A.A. Lange). Technical Note No. 185 (WMO-No. 641). Geneva.
- , 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21 (WMO/TD-No. 175). Geneva.
- , 1987: *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30 (WMO/TD-No. 195). Geneva.
- , 1989: An algorithmic approach for improving and controlling the quality of upper-air data (A.A. Lange). Paper presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV). Instruments and Observing Methods Report No. 35 (WMO/TD-No. 303). Geneva.
- , 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40 (WMO/TD-No. 451). Geneva.
- , 1994: A new GPS rawinsonde system (D.B. Call). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94). Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Geneva.
- , 1996: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV, Tsukuba (Japan), 1993: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59 (WMO/TD-No. 742). Geneva.
- , 2005: Studying the accuracy of AFAR-based radar sounding system (A. Ivanov and V. Tseitlin). Paper and posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005). Instruments and Observing Methods Report No. 82 (WMO/TD-No. 1265). Geneva.

- , 2006a: *WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Alcântara (Brazil), 2001* (R. da Silveira, G.F. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall’Antonia, L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques and J. Nash). Instruments and Observing Methods Report No. 90 (WMO/TD-No. 1314). Geneva.
- , 2006b: *WMO Intercomparison of Radiosonde Systems – Vacoas (Mauritius), 2005* (J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko). Instruments and Observing Methods Report No. 83 (WMO/TD-No. 1303). Geneva.
- , 2008: Suggestions for upgrading the pilot balloon network in West Africa and elsewhere in the tropics (M. Douglas, J. Mejia, R. Orozco and J. Murillo). Paper and poster presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2008). Instruments and Observing Methods Report No. 96 (WMO/TD-No. 1462). Geneva.
- , 2011b: *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems – Yangjiang (China), 2010* (J. Nash, T. Oakley, H. Vömel and L. Wei). Instruments and Observing Methods Report No. 107 (WMO/TD-No. 1580). Geneva.
-