

Методы и средства дистанционного мониторинга и прогнозирования состояния нижней тропосферы

Н.П. Красненко

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
E-mail: krasnenko@imces.ru*

Рассматриваются проблемы текущего мониторинга метеорологического состояния нижней тропосферы над заданной территорией, пространственного и временного прогнозирования полей метеорологических величин и характеристик турбулентности. Описывается разрабатываемый аппаратно-программный комплекс, состоящий из распределенных по территории измерительных пунктов дистанционного зондирования (или исследовательский полигон) в окрестностях г. Томска, для решения этих задач. Аппаратная часть комплекса состоит из макетной измерительной сети дистанционных и локальных измерителей метеорологических параметров атмосферы, основу которых составляют стационарные трехкомпонентные доплеровские содары, обеспечивающие контроль за температурно-ветровой структурой и характеристиками турбулентности, температурные профиломеры, измеряющие вертикальный профиль температуры, метеостанции на мачтах для опорных измерений метеорологических параметров в приземном слое и др. Программно-алгоритмический комплекс разработан в виде многофункциональной профессионально-ориентированной вычислительной системы и обеспечивает решение ряда задач, в т.ч. сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы (температура, составляющие скорости ветра, характеристики турбулентности), выполняемого на основе оперативных данных измерительной сети. Также для определения параметров тропосферы по спутниковым навигационным сигналам разработаны алгоритмы и методика определения влагосодержания тропосферы, проведены предварительные исследования.

Problems of real-time monitoring of the meteorological state of the lower troposphere over the examined territory and of spatiotemporal prediction of fields of meteorological parameters and turbulence characteristics are considered. The hardware-software complex is being developed comprising measuring stations of remote sounding (measuring site) distributed over the measuring site in the vicinity of Tomsk and intended for solving these problems is described. The hardware of the complex consists of the prototype of the measuring network of the devices for remote and local measurements of the meteorological parameters of the atmosphere based on stationary three-component Doppler sodars providing monitoring of the temperature and wind velocity structure and turbulent characteristics, temperature profilometers measuring the vertical temperature profiles, meteorological stations mounted on meteorological masts in the surface layer, etc. The program-algorithmic complex for measurements of the meteorological parameters has been developed in the form of a multipurpose target-oriented computing system that provides the solution of a number of problems, including supershort-term forecast of the atmospheric state parameters (temperature, wind velocity components, and turbulence characteristics) from real-time data of the measuring network. Algorithms and procedures for determining the parameters of the troposphere from satellite navigation signals, including the moisture content in the troposphere, have also been developed, and preliminary investigations have been performed.

Введение

Оперативный контроль (мониторинг) состояния нижней тропосферы или более конкретной - атмосферного пограничного слоя (АПС), включающего в себя и приземный слой, над определенной заданной территорией, играет важную роль в обеспечении жизнедеятельности людей, а прогнозирование его состояния имеет целью предупредить о возникновении каких-либо неблагоприятных или опасных атмосферных явлениях.

Проблема мониторинга состояния атмосферы, а также сверхкраткосрочного прогноза и пространственной экстраполяции параметров состояния приземного и пограничного слоев атмосферы на ограниченной территории является крайне актуальной. Это обусловлено тем, что низкая плотность и большая неоднородность сети аэрологических и метеорологических станций по территории России является серьезным ограничением для решения задач объективного анализа мезометеорологических полей. Кроме этого, отсутствие данных о вертикальном распределении метеорологических величин, а также характеристик турбулентности, полученных с высоким пространственно-временным разрешением, является сдерживающим фактором для решения проблемы сверхкраткосрочного прогноза с заблаговременностью до нескольких часов.

АПС это наиболее изменчивая часть атмосферы. Исследования структуры и динамики этого слоя имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Если в приземном слое атмосферы измерения вертикальных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности достаточно хорошо отработаны прежде всего с помощью метеомачт, с расположенными на них датчиками, и существуют модели их поведения, то в пограничном слое все сложнее. Для приземного слоя, в частности, разработана теория подобия Мони́на - Обухова, по которой профили метеорологических величин, таких, например, как температура и скорость ветра определяются через универсальные функции, зависящие от типа стратификации атмосферы, шероховатости подстилающей поверхности. Построение общей теории АПС, аналогичной вышеупомянутой для приземного слоя, довольно затруднительно из-за многофакторности зависимостей.

Метеорологические мачтовые измерения и аэрологические средства не обеспечивают высокого пространственного разрешения и, следовательно, не фиксируют тонкую структуру метеорологических полей в АПС. Также ввиду стационарного расположения измерительных пунктов они проводят измерения только в условиях фиксированной подстилающей поверхности.

Для мониторинга метеорологического состояния АПС и последующего его прогнозирования целесообразно применять современные методы и средства дистанционного зондирования атмосферы с поверхности Земли с использованием радио, оптических и акустических средств. Причем наиболее предпочтительными средствами для этих целей представляется доплеровская звуковая локация (акустическое зондирование), которая использует в качестве атмосферных рассеивателей, увлекаемых ветровым потоком, турбулентные вихри и является эффективным средством измерения структуры температурно-ветровых полей, а также пассивная радиометрия, количественно определяющая вертикальный профиль температуры.

Акустические локаторы (сонары), обладая высоким пространственным и временным разрешением и получающие информацию в реальном масштабе времени круглосуточно, наряду с радиометрами, являются уникальным инструментом для текущего мониторинга АПС. Они позволяют получать длинные временные ряды непрерывных наблюдений с высоким пространственным разрешением до нескольких метров и временным (статистически надежные профили ветра и характеристик турбулентности доступны с осреднением, как правило, от 10 до 30 мин) разрешением и анализировать их пространственно-временную динамику. Высота зондирования АПС, при измерениях акустическим локатором, обычно ограничивается несколькими сотнями метров (определяется частотой зондирования и энергетикой) и в основном зависит от текущих метеоусловий. Вертикальный профиль, фактически измеренных

метеовеличин, может быть экстраполирован на большие высоты с помощью определенных алгоритмов и моделей.

Наряду с дистанционными средствами целесообразно использование других локальных средств измерения, например, ультразвуковых метеостанций в качестве опорных измерителей параметров приземного слоя атмосферы и метеоизмерителей на основе беспилотных летательных аппаратов.

В докладе рассматриваются результаты разработок и исследований по указанной проблеме, проводящиеся в Томске в ИМКЭС СО РАН и ТУСУРе [1-4]. Их цель заключается в разработке средств мониторинга, создании и использовании исследовательского метеорологического полигона, оснащенного современными средствами дистанционного зондирования (аппаратно-программный комплекс) для контроля, пространственного и временного прогнозирования метеорологических полей в нижней тропосфере над территорией в окрестности г. Томска, а также для верификации самих измерительных средств.

Структура и состав аппаратно-программного комплекса

На основе вышеизложенного, предложена структура (рис. 1) и разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), обеспечивающий измерения вертикальных профилей метеорологических параметров и характеристик турбулентности в заданных точках территории, пространственное и временное прогнозирование полей метеорологических величин и характеристик турбулентности.

Аппаратно-программный комплекс включает две основных составляющих: аппаратную (измерительную) часть и информационную - программно-алгоритмический комплекс (ПАК). Аппаратная часть комплекса состоит из макетной измерительной сети (г. Томск – ИМКЭС СО РАН, п. Аникино – радиофизический полигон НИИ радиотехнических систем ТУСУР, п. Головино – аэродром РОСТО (ДОСААФ)) дистанционных и локальных измерителей метеорологических параметров атмосферы, основу которых составляют стационарные трехкомпонентные доплеровские содары «Звук-3», обеспечивающие контроль за температурно-ветровой структурой и характеристиками турбулентности АПС, температурные профилемеры МТР-5, измеряющие вертикальный профиль температуры до высоты 1 км, измерители характеристик облачности и солнечной радиации, метеостанции на мачтах для опорных измерений метеорологических параметров в приземном слое и др.

Для верификации акустических измерений, уточнения параметров модели и обеспечения работы алгоритмов вертикальной экстраполяции метеовеличин прорабатывается применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в виде мультикоптеров. Оснащение их метеоизмерителями позволяет получать контактные измерения вертикальных профилей метеовеличин в АПС при подъеме и посадке аппарата. С учетом полученных данных высота восстановленных профилей метеовеличин может достигать нескольких километров, что позволяет контролировать состояние нижней части тропосферы.

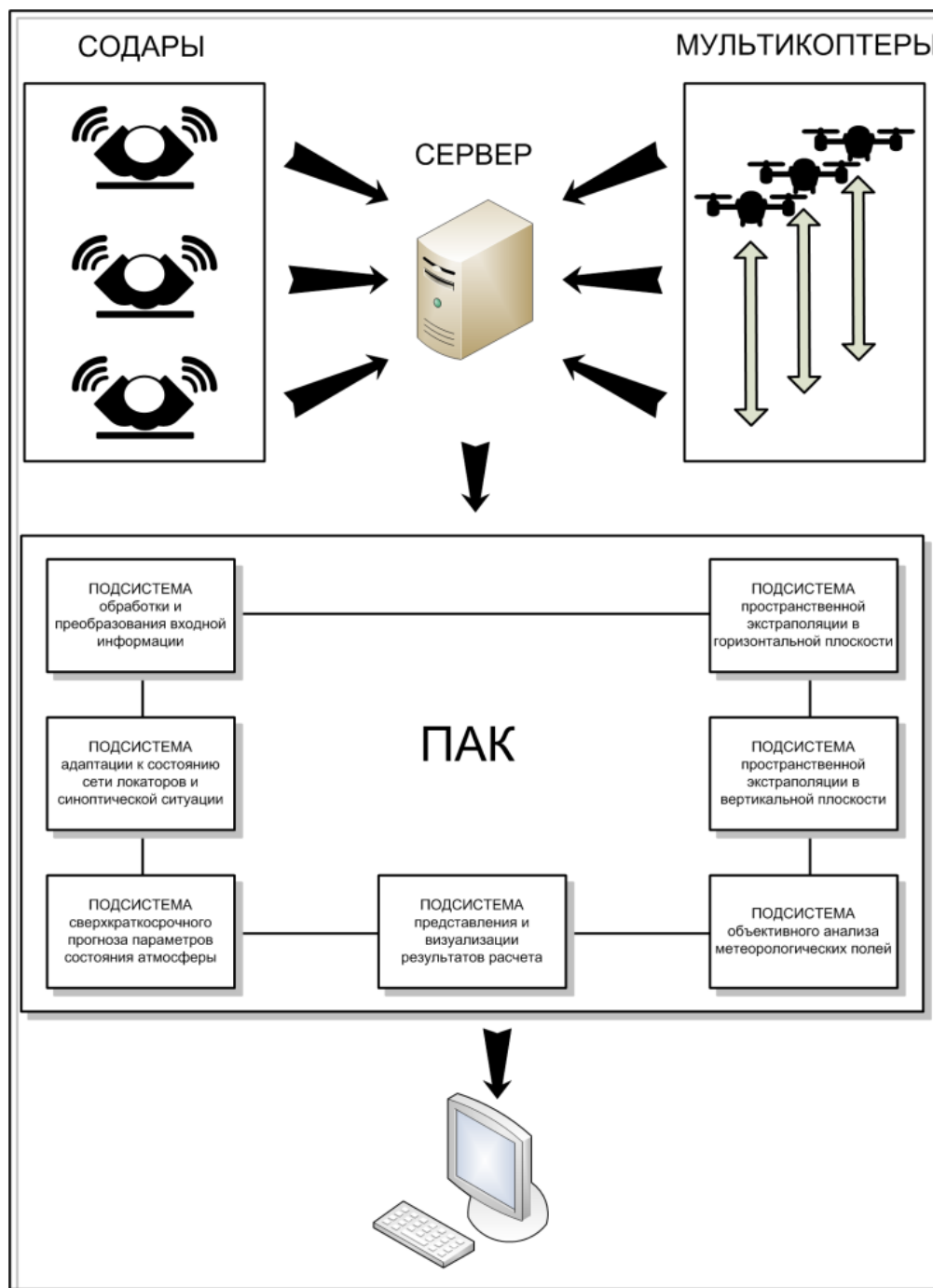


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-програмного комплекса контроля, пространственного и временного прогнозирования метеополей с системой верификации данных, полученных с метеоизмерителей установленных на мультикоптерах

Аппаратная (измерительная часть) комплекса

Как уже говорилось выше, основными дистанционными измерителями являются доплеровские акустические локаторы (рис. 2), они располагаются во всех трех точках, и радиометры (температурные профилемеры МТР-5). Профилемеры (рис. 2) располагаются только в двух измерительных точках.



Рис. 2 – Метеорологические измерители: содар «Звук-3», большой содар, температурный профилемер МТР-5 в ИМКЭС СО РАН (Томск)

Стационарный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 (рис. 3, а) размещен на мачте (рис. 3, б) и предназначен для автоматических измерений и регистрации значений основных метеорологических величин:

- скорости и направления горизонтального ветра;
- скорости вертикального ветра;
- температуры воздуха;
- относительной влажности воздуха;
- атмосферного давления
- параметров турбулентности.

Беспилотный измеритель профилей метеорологических величин тропосферы с портативной электронной метеостанцией показан на рис. 3, в.

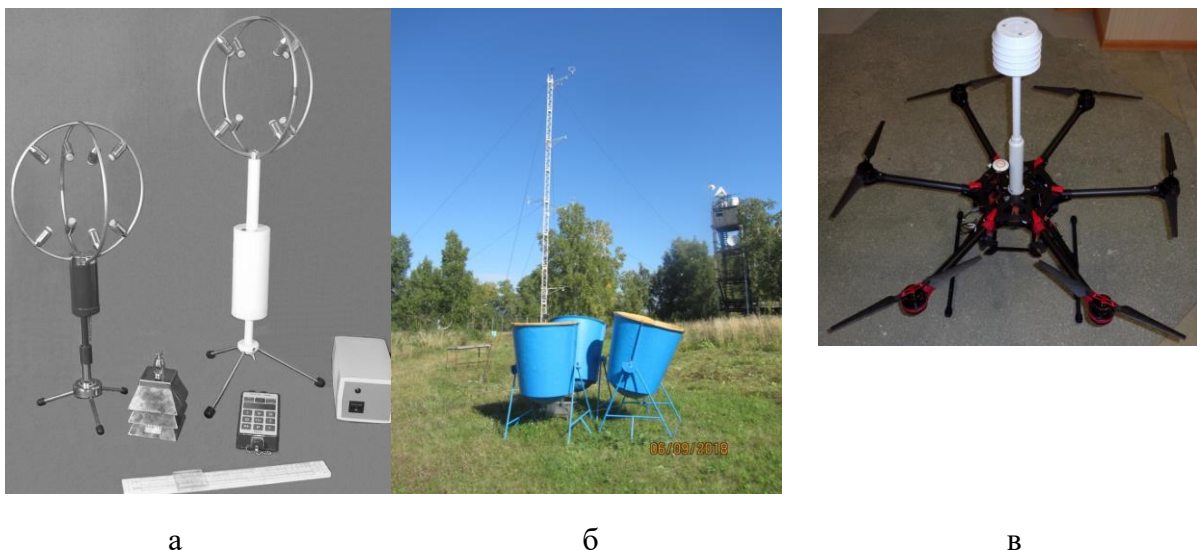


Рис. 3. Метеокомплекс АМК-03 (а), метеомачта с содаром на полигоне ТУСУР (б), БПЛА на гексакоптере DJI (модель S900) с измерителем метеовеличин на штоке высотой 0,5 м (в)

Проведенные испытания его макета показали, что можно измерять строго вертикальные профили метеовеличин, в отличие от шар-зонда, траектория которого зависит от ветра, и горизонтальные по заданной траектории полета над определенной территорией. Вертикальное разрешение зависит от скорости подъема и постоянной времени используемых датчиков. Во время экспериментальных полётов вертикальное разрешение составляло 10-15 м. Полученные полетные данные позволяют оценить достижимую высоту измерений с помощью данного БПЛА, не менее 3 км. При этом время подъема составит до 15 минут, а на спуск потребуется до 8 минут. Микрокоптер достаточно оперативно может быть запущен несколько раз по заданной трассе, что позволяет отслеживать динамику измеряемых профилей метеопараметров. Результаты испытаний позволяют рассматривать его как эффективное средство для оперативной верификации и дополнения дистанционных методов зондирования атмосферы.

Также проводятся разработки и испытания мобильных содаров на основе фазированных антенных решеток для организации дополнительных измерительных точек на территории полигона.

Измерительная сеть

Измерительная сеть АПК включает три разнесенные в пространстве измерительные станции (ИС). Каждая ИС оснащена оборудованием (стационарным и мобильным) для измерения метеорологических параметров приземного и пограничного слоев атмосферы. На данном этапе реализуется их автономная работа, но проводится проработка получения измеренных данных по каналам связи на центральный сервер в хранилище данных для последующей обработки с помощью программно-алгоритмического комплекса (ПАК).

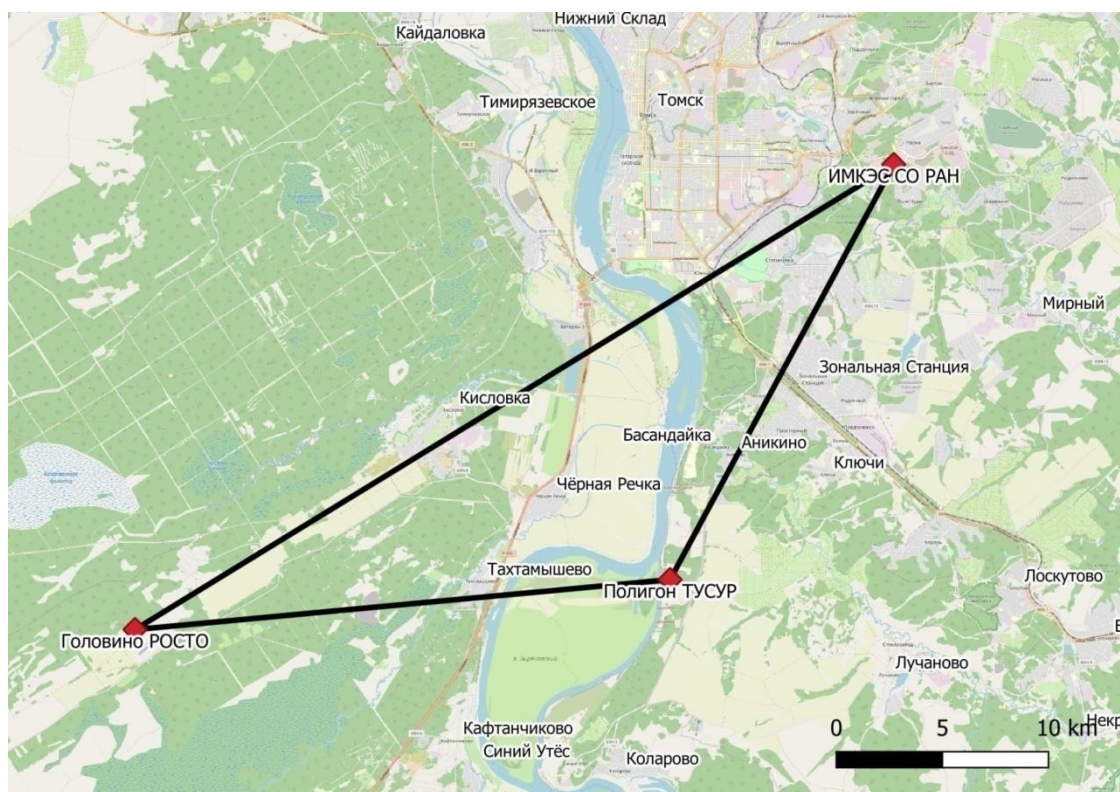


Рис. 4. Схема расположения измерительных пунктов АПК на местности

Таким образом аппаратно-программный комплекс состоит из макетной сети дистанционных измерителей, канала передачи данных, серверной станции и программно-алгоритмического комплекса (ПАК).

Схема расположения пунктов измерений метеопараметров на местности в окрестности г. Томска и центрального сервера (ИМКЭС) показана на рис. 4. Сервер принимает данные с измерительной сети и обрабатывает полученную информацию с помощью программно-алгоритмического комплекса (ПАК).

Характеристики измерительной части макетной сети АПК по контролю текущего состояния АПС определяются прежде всего измерительными возможностями составляющих её основу доплеровских содаров и других технических средств.

Программно-алгоритмический комплекс

Возможности прогнозирования состояния АПС определяются программно-алгоритмическим комплексом (ПАК), составляющим основу информационной части АПК. ПАК разработан на основе динамико-стохастической модели с использованием линейной фильтрации Калмана.

ПАК существует в виде многофункциональной профессионально-ориентированной вычислительной системы, обеспечивающей решение следующих функциональных задач:

- пространственной экстраполяции (интерполяции) температуры, составляющих скорости ветра, мезомасштабных ветровых сдвигов и характеристик турбулентности в приземном и пограничном слоях атмосферы, осуществляемой по результатам оперативного дистанционного акустического зондирования, в точку с заданными координатами, расположенную на неосвещенной данными наблюдений, территории;
- сверхкраткосрочного (с заблаговременностью до 12 ч.) прогноза параметров состояния атмосферы (температура, составляющие скорости ветра, характеристики турбулентности), выполняемого на основе оперативных данных дистанционного акустического зондирования для заданного района;
- пространственной экстраполяции вертикального профиля метеорологической величины с восстановлением значений на высотных уровнях, где данные измерений искажены или отсутствуют.

В состав ПАК входят следующие подсистемы:

- подсистема преобразования и обработки входной информации,
- подсистема адаптации к состоянию измерительной сети и синоптической ситуации,
- подсистема сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы в точку с заданными координатами,
- подсистемы пространственной интерполяции в горизонтальной и вертикальной плоскостях,
- подсистема представления и визуализации результатов расчета,
- интерфейс пользователя.

Работа всех перечисленных подсистем осуществляется с помощью интерфейса пользователя, через который осуществляется настройка параметров системы, вывод результатов расчета на монитор, принтер и сохранение результатов в хранилище, с которого предполагается в дальнейшем реализовать процедуру передачи полученных результатов в качестве первичных параметров для более сложных комплексов на основе гидродинамических моделей, либо по каналам связи потребителям прогностической информации.

Реализация работы аппаратно-программного комплекса

Согласно структурной схеме, АПК работает следующим образом. В каждой точке макетной сети дистанционных и локальных метеорологических измерителей проводятся измерения необходимых метеорологических величин. После этого по каналам системы передачи данных результаты измерений передаются на сервер, где аккумулируются в хранилище данных. Переданные данные из хранилища с помощью программного модуля загружаются в ПАК, где происходит их дальнейшая обработка. Результаты расчета данных отображаются на мониторе.

Программно-алгоритмический комплекс обеспечивает усвоение приземных метеопараметров, данных акустического и микроволнового зондирования от сети наземных пунктов с последующей пространственной интерполяцией. Комплекс предназначен для численного восстановления, пространственного и временного прогнозирования турбулентности, температуры и скорости.

Программно-алгоритмический комплекс реализует динамико-стохастическую модель в виде многофункциональной профессионально-ориентированной вычислительной системы, обеспечивающей пространственную экстраполяцию (интерполяцию) профилей метеорологических параметров, характеристик турбулентности и мезомасштабных ветровых сдвигов в приземном и пограничном слоях атмосферы, осуществляемой по результатам оперативного дистанционного акустического зондирования, в точку с заданными координатами, расположенную на неосвещенной данными наблюдений, территории, а также сверхкраткосрочный прогноз параметров состояния атмосферы (температура, турбулентность, составляющие скорости ветра) для заданного района.

Предполагается, что ПАК позволит восстанавливать и прогнозировать поля метеорологических параметров – скорости ветра (3 компоненты), температуры, турбулентности, со следующими характеристиками:

- | | |
|--|--------------|
| - дальность экстраполяции в горизонтальной плоскости | до 100 км; |
| - высота слоя экстраполяции | до 2 км; |
| - заблаговременность прогноза | до 12 часов; |

диапазоны изменения скоростей ветра:

- | | |
|----------------------------|---------------|
| - горизонтальный ветер | 0.2...30 м/с; |
| - вертикальный ветер | ± 2 м/с; |
| - точность прогнозирования | ± 2 м/с; |
| - достоверность прогноза | 0,8. |

В целом работа комплекса должна обеспечивать измерения и прогнозирование полей метеорологических величин: температуры, составляющих скорости ветра, мезомасштабных ветровых сдвигов и характеристик турбулентности в приземном и пограничном слоях атмосферы. Оценка состояния метеополей и экстраполяция выполняется по результатам оперативных дистанционных и локальных измерений различными средствами.

Измерение параметров тропосферы по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем

В дополнение к имеющимся измерителям температурно-ветровой структуры АПС прорабатываются вопросы измерения профиля влажности тропосферы. Разработаны алгоритмы и методика определения влагосодержания тропосферы из полученных данных по зенитной тропосферной задержке навигационных сигналов. Проведенные предварительные исследования показали на принципиальную возможность таких измерений.

Реализация данного метода по определению вертикального профиля влажности воздуха позволит существенно дополнить разработанный аппаратно-программный комплекс контроля состояния нижней тропосферы.

Заключение

Рассмотрено решение проблем текущего мониторинга метеорологического состояния нижней тропосферы над заданной ограниченной территорией, пространственного и временного прогнозирования полей метеорологических величин и характеристик турбулентности. Описан аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий измерения вертикальных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности нижней тропосферы в заданных точках территории и их прогнозирование. Аппаратная часть комплекса состоит из макетной измерительной сети дистанционных и локальных измерителей метеорологических параметров атмосферы, основу которых составляют стационарные трехкомпонентные доплеровские содары «Звук-3», обеспечивающие контроль за температурно-ветровой структурой и характеристиками турбулентности атмосферного пограничного слоя, температурные профилемеры МТР-5, измеряющие вертикальный профиль температуры до высоты 1 км, метеостанции на мачтах для опорных измерений метеорологических параметров в приземном слое и др. Измерительная сеть включает три разнесенные в пространстве измерительные станции. Каждая ИС оснащена оборудованием (стационарным и мобильным) для измерения метеорологических параметров приземного и пограничного слоев атмосферы. Полученные измерения по каналам связи поступают на центральный сервер в хранилище данных и, в последующем, обрабатываются с помощью программно-алгоритмического комплекса. ПАК разработан в виде многофункциональной профессионально-ориентированной вычислительной системы и обеспечивает решение ряда задач, в т.ч. сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния атмосферы (температура, составляющие скорости ветра, характеристики турбулентности), выполняемого на основе оперативных данных измерительной сети.

Приведены результаты по исследованию возможностей содарных измерений пространственно-временной динамики нижней тропосферы: термической структуры, полей скорости ветра, продольных и поперечных структурных функций поля скорости ветра, структурных характеристик полей температуры и скорости ветра, кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации, внешних масштабов температурной и динамической турбулентности.

Также, на основе разработанных алгоритмов, проведены предварительные исследования влагосодержания тропосферы по сигналам ГНСС.

Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту задания Минобрнауки РФ № 5.3279.2017/4.6 и по проекту фундаментальных исследований СО РАН № IX.138.2.5.

Литература

1. Разработка методов и приборов зондирования нижних слоев тропосферы и их использование / Отчет о научно-исследовательской работе промежуточного этапа 1: Разработка аппаратных измерительных средств определения параметров тропосферы. ТУСУР. Томск. 2017. 163 с. № госрегистрации АААА-А17-117073110014-6.
2. Разработка методов и приборов зондирования нижних слоев тропосферы и их использование / Отчет о научно-исследовательской работе промежуточного этапа 2:

Разработка аппаратно-программного комплекса определения параметров тропосферы. ТУСУР. Томск. 2019. 80 с. № госрегистрации АААА-А17-117073110014-6.

3. Научно-методические основы создания и использования технологий и информационно-измерительных комплексов для дистанционного мониторинга нижнего слоя атмосферы / Отчет о научно-исследовательской работе, этап 1. ИМКЭС СО РАН. Томск, 2017. 59 с. № госрегистрации АААА-А17-117013050033-2.

4. Научно-методические основы создания и использования технологий и информационно-измерительных комплексов для дистанционного мониторинга нижнего слоя атмосферы / Отчет о научно-исследовательской работе, этап 2. ИМКЭС СО РАН. Томск, 2018. 53 с. № госрегистрации АААА-А17-117013050033-2.