

УДК 551.501.7

Развитие дистанционных методов и средств изучения нижней атмосферы в ИМКЭС СО РАН

Н.П. Красненко^{1, 2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.

Рассматриваются результаты исследований ИМКЭС СО РАН, связанных с разработкой и использованием средств дистанционного зондирования для текущего мониторинга метеорологического состояния атмосферы. Это, прежде всего, средства активного акустического зондирования, а также средства радиометрического (пассивного) зондирования, в целом обеспечивающие контроль температурно-ветровой структуры и характеристик турбулентности в нижнем слое атмосферы и влагосодержания тропосферы. Описывается аппаратно-программный комплекс мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы над заданной территорией в окрестностях г. Томска, состоящий из распределенных по территории измерительных пунктов дистанционного зондирования (исследовательский полигон).

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, средства дистанционного зондирования, акустическое зондирование, содар, радиометр, аппаратно-программный комплекс; atmospheric boundary layer, remote sensing means, acoustic sounding, sodar, radiometer, hardware-software complex.

Введение

Исследование нижней атмосферы, а конкретнее атмосферного пограничного слоя (АПС), играет важную роль не только при изучении физических процессов в атмосфере, но и в ряде практических приложений. Прогнозирование состояния АПС необходимо для предупреждения возникновения каких-либо неблагоприятных или опасных атмосферных явлений. Информация об АПС особенно важна для обеспечения жизнедеятельности людей, проживающих на подконтрольной территории или ведущих на ней хозяйственную деятельность. Однако низкая плотность и большая неоднородность сети аэрологических и метеорологических станций на территории России не позволяют в полной мере решить указанные задачи. На это влияет и отсутствие данных о вертикальном распределении метеорологических величин, а также характеристик турбулентности, полученных с высоким пространственно-временным разрешением.

АПС — это наиболее изменчивая часть атмосферы. Если в приземном слое атмосферы достаточно хорошо отработаны измерения вертикальных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности, прежде всего, с помощью метеомачт с расположенными на них датчиками, то в пограничном слое все сложнее [1, 2].

Метеорологические мачтовые и аэрологические средства в целом не обеспечивают измерения тонкой

структуры и динамики метеорологических полей АПС с высоким пространственным и временным разрешением, а тем более не измеряют характеристики турбулентности, необходимые для моделирования физических процессов и решения задачи прогнозирования.

Для текущего оперативного контроля метеорологического состояния АПС (вертикальной структуры) и последующего его прогнозирования применяются современные методы дистанционного зондирования атмосферы с поверхности Земли с использованием радио-, оптических и акустических средств. Достижения в этой области регулярно рассматриваются на международном симпозиуме ISARS, в частности на последнем (2020 г.) [3]. В ИМКЭС СО РАН используются акустическое зондирование и пассивная радиометрия.

Акустические локаторы (содары), круглосуточно контролирующие температурно-ветровую структуру в реальном масштабе времени, — уникальный инструмент для мониторинга АПС [4–9]. Они позволяют получать длинные временные ряды непрерывных наблюдений с высоким пространственным (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 в АПС определяется несущей частотой и энергетикой локатора и зависит от текущих метеоусловий и шумов. Наиболее широко применяются моностатические локаторы, позволяющие

* Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru).

проводить профильные измерения характеристик атмосферы, и радиометры [10], количественно определяющие вертикальный профиль температуры.

Наряду с дистанционными целесообразно использование локальных (контактных) средств измерения, в том числе ультразвуковых метеостанций, в качестве опорных измерителей параметров приземного слоя атмосферы и метеоизмерителей на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

В настоящей работе приведены некоторые итоги развития в ИМКЭС СО РАН дистанционных методов и средств зондирования нижней атмосферы, в основном акустических. В результате созданы средства мониторинга, исследовательский метеорологический полигон, оснащенный современными средствами дистанционного зондирования для измерения, пространственного и временного прогнозирования метеорологических полей в нижней атмосфере над определенной территорией, а также для верификации самих измерительных средств. Развитие атмосферных акустических технологий в институте в предыдущие годы частично освещено в [11, 12]. Результаты работ по содарной тематике в ИФА РАН и ИОА СО РАН изложены в [8, 9].

Развитие методологии и технологии измерительных средств

Использование звукового излучения для дистанционного зондирования атмосферы (акустическое зондирование) основано на способности акустических волн рассеиваться на неоднородностях, образующих атмосферной турбулентностью.

Моностатические содары в основном применяются для определения и визуализации температурно-ветровой стратификации АПС, типа стратификации (класса устойчивости атмосферы), измерения профилей вектора скорости ветра, различных характеристик турбулентности. Они хорошо визуализируют мелкомасштабную структуру турбулентности в реальном времени, контролируют термическую структуру АПС, определяют границы приземных и приподнятых инверсий и высоты слоя перемешивания, обнаруживают перемежаемость турбулентности и волновые движения.

Наши исследования в последние годы были направлены на расширение измерительных возможностей содаров, в частности на определение структурных функций и постоянных флуктуаций температуры и скорости ветра, турбулентного потока, внешних масштабов температурной и динамической турбулентности, кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и др. [13–24]. Совершенствование методологии и алгоритмов обработки данных содарного зондирования происходило с целью минимизации погрешностей доплеровских измерений компонентов скорости ветра ме-

тодом непараметрической статистики [25]. Были созданы алгоритмы обработки содарных данных, позволяющие одновременно определять и визуализировать различные пространственно-временные характеристики нижнего слоя атмосферы [14, 19–24].

Развитие содарных средств шло по пути разработки и совершенствования отдельных элементов и их тиражирования для создания распределенной по территории измерительной сети содаров [5–7]. В соответствии с современными мировыми тенденциями проводились исследования и разработки антенных решеток [26–30] с перспективой их использования в качестве антенных систем содаров. Один из недостатков содаров заключается в том, что они традиционно используют параболические антенны, а это приводит к большим массогабаритным характеристикам и отсутствию мобильности. Антенная решетка с электронным сканированием диаграммы направленности [27] вместо трех антенн на параболах позволит в перспективе существенно уменьшить габариты доплеровского содара для измерения вектора скорости ветра и увеличить высоту зондирования за счет увеличения излучаемой мощности. Другой путь решения проблемы заключается в использовании параметрических антенных решеток в содарах [30]. Пока приходится использовать более простые доплеровские содары «Звук-3» с параболическими антеннами [5, 6], применяя защиту от снега и наледи [31] при эксплуатации зимой.

Исследовательский полигон (аппаратно-программный комплекс)

Для отработки задач мониторинга АПС в окрестности г. Томска был создан исследовательский полигон. Его структура представлена на рис. 1. Аппаратно-программный комплекс (АПК) [32, 33] обеспечивает синхронные измерения вертикальных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности в окрестностях Томска, а также их пространственное и временное прогнозирование.

АПК включает две основные составляющие: аппаратную (измерительную) часть и информационную — программно-алгоритмический комплекс (ПАК). Аппаратная часть комплекса состоит из макетной измерительной сети (г. Томск — ИМКЭС СО РАН, пос. Аникино — радиофизический полигон НИИ радиотехнических систем ТУСУР, пос. Головино — аэродром РОСТО (ДОСААФ)) дистанционных и локальных измерителей метеорологических параметров атмосферы, основу которых составляют стационарные трехкомпонентные доплеровские содары «Звук-3» [6], обеспечивающие контроль температурно-ветровой структуры и характеристик турбулентности АПС, метеорологические температурные профилемеры МТР-5 (радиометры) [10], измеряющие вертикальный профиль температуры до высоты 1 км,

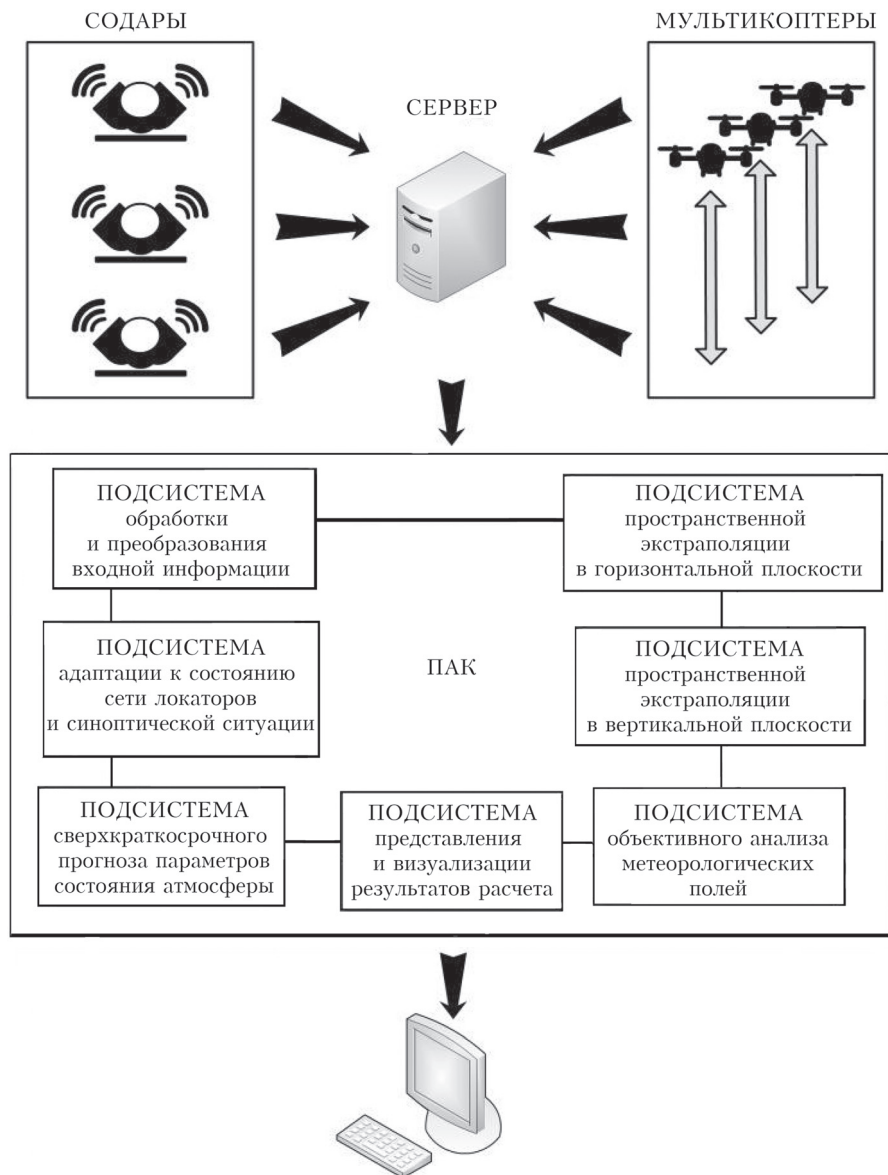


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса контроля, пространственного и временного прогнозирования метеополей с системой верификации данных на основе измерений с мультикоптеров

измерители характеристик облачности и солнечной радиации, метеостанции на мачтах для опорных измерений метеорологических параметров в приземном слое.

Для верификации акустических измерений, уточнения параметров модели и обеспечения работы алгоритмов вертикальной экстраполяции измеренных метеовеличин применяются мультикоптеры. Оснащение их метеоизмерителями позволяет получать контактные измерения вертикальных профилей метеовеличин АПС при подъеме и спуске аппарата.

Аппаратная (измерительная часть) комплекса

Основные дистанционные измерители параметров атмосферы — это доплеровские акустические ло-

каторы (рис. 2), которые располагаются во всех трех пунктах измерительной сети, и радиометры (температурные профилемеры МТР-5). Профилемеры располагаются только в ИМКЭС СО РАН и на полигоне ТУСУР.

Во всех трех измерительных пунктах имеются метеорологические измерители стандартного типа и ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 [34], размещенные на мачтах и предназначенные для автоматических измерений и регистрации основных метеорологических величин в приземном слое атмосферы:

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



Рис. 2. Метеорологические измерители: *а* – в ИМКЭС СО РАН (содар «Звук-3» (три антенны на заднем плане), большой содар (одна антенна справа), температурный профилемер МТР-5); *б* – на полигоне ТУСУР (содар «Звук-3» (три антенны на переднем плане), многоуровневая 20-метровая метеомачта); *в* – на аэродроме в Головино (содар «Звук-3» (три антенны справа на земле), метеодатчики на мачтах)

Кроме того, АМК-03 обеспечивает измерение параметров турбулентности.

Также в ИМКЭС СО РАН и на полигоне ТУСУР выполняются автоматические регулярные измерения характеристик облачности и солнечной радиации [35] и периодические измерения метеорологических величин атмосферы (температуры, влажности, давления воздуха) портативной электронной метеостанцией, установленной на квадрокоптере Walkera Voyager 3 [36]. Измерения на беспилотных летательных аппаратах используются для верификации и дополнения дистанционных методов зондирования атмосферы.

В настоящее время проводятся разработки и испытания мобильных содаров на основе фазированных антенных решеток для организации дополнительных измерительных точек на полигоне [28, 30, 37].

В дополнение к имеющимся измерителям температурно-ветровой структуры АПС прорабатываются вопросы измерения профиля влажности тропосферы по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем [38]. Разработаны алгоритмы и методика определения влагосодержания тропосферы из полученных данных по зенитной тропосферной задержке навигационных сигналов. Предварительные исследования показали принципиальную возможность таких измерений. Реализация описанного метода определения вертикального профиля

влажности воздуха позволит существенно дополнить созданный аппаратно-программный комплекс контроля состояния нижней атмосферы.

Проведена частичная апробация измерительных возможностей используемых средств контроля пространственно-временной динамики АПС [5, 7, 14, 20, 23, 39–42], в том числе для прогнозирования таких опасных явлений, как грозы и шквалы [43].

Измерительная сеть

Измерительная сеть АПК включает три вышеописанных разнесенных в пространстве измерительных пункта. В настоящее время они работают автономно, но проводится работа по получению измеренных данных по каналам связи на центральный сервер в хранилище данных для последующей обработки с помощью ПАК. Схема расположения пунктов измерений метеопараметров на местности в окрестности г. Томска и центрального сервера (ИМКЭС) показана на рис. 3.

Характеристики макетной сети АПК по контролю текущего состояния АПС определяются, прежде всего, измерительными возможностями составляющих ее основу доплеровских содаров, радиометра и других технических средств.

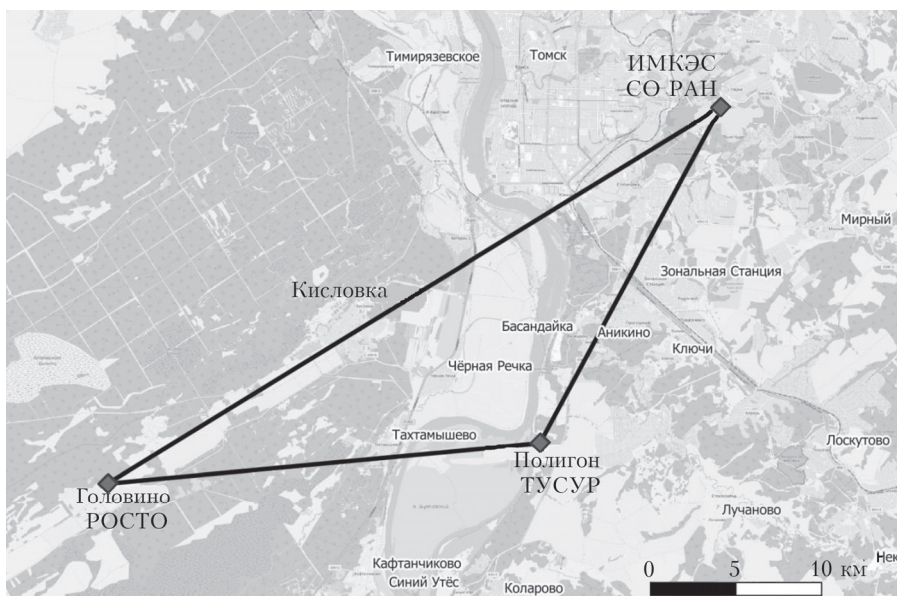


Рис. 3. Схема расположения измерительных пунктов АПК на местности

Программно-алгоритмический комплекс

Возможности прогнозирования состояния АПС определяются программно-алгоритмическим комплексом, составляющим основу информационной части АПК.

Заложено использование двух видов ПАК: ПАК-1, работающего на основе модели WRF (Weather Research and Forecasting), и ПАК-2 на основе динамико-стохастической модели с использованием линейной фильтрации Калмана [32, 33, 39, 40]. Структура ПАК показана на рис. 1.

ПАК обеспечивает усвоение данных измерений от сети наземных пунктов с последующей пространственной экстраполяцией (интерполяцией) измеренных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности в приземном и пограничном слоях атмосферы в точку с заданными координатами, а также сверхкраткосрочный прогноз параметров состояния атмосферы (температура, турбулентность, скорость ветра) для заданного района.

Заключение

Приведены результаты исследований и разработок в области дистанционного акустического зондирования в ИМКЭС СО РАН. Рассмотрено решение проблемы текущего мониторинга и прогнозирования метеорологического состояния нижней атмосферы над заданной ограниченной территорией с использованием дистанционных средств измерения. Описан аппаратно-программный комплекс для измерения и прогнозирования вертикальных профилей метеорологических величин и характеристик турбулентности нижней атмосферы в окрестностях Томска.

Разработанный комплекс обеспечивает мониторинг пространственно-временной динамики нижней атмосферы: 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 ее диссипации, внешних масштабов температурной и динамической турбулентности, и сверхкраткосрочное прогнозирование ряда характеристик.

Автор выражает благодарность всем своим сотрудникам и соавторам, без совместной работы с которыми было бы невозможно решение этой комплексной проблемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8).

1. *Пограничные слои атмосферы. Природа, теория и приложения к моделированию и охране окружающей среды* / под ред. А. Бакланова, Б. Гризогоно. М.: ГЕОС, 2012. 260 с.
2. *Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои*. М.: Физматлит, 2013. 247 с.
3. URL: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/isars2020> (дата обращения: 05.11.2021).
4. *Красненко Н.П. Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы* // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина. М.: Радиотехника, 2009. Вып. 11. С. 143–154.
5. *Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Sodars and their application for investigation of the turbulent structure of the lower atmosphere* // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48. P. 012025.
6. *Красненко Н.П. Содары для зондирования атмосферного пограничного слоя* // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 82–89.
7. *Красненко Н.П. Методы и средства дистанционного мониторинга и прогнозирования состояния нижней*

- тропосферы // Всерос. открытые Армандовские чтения «Муром-2019». Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2019. С. 20–29.
8. *Каллистратова М.А., Петенко И.В., Кузнецов Р.Д., Куличков С.Н., Чхетиани О.Г., Чунчузов И.П., Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Вазаева Н.В., Кузнецов Д.Д., Перепелкин В.Г., Буш Г.А.* Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя (обзор работ ИФА им. А.М. Обухова РАН) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2018. Т. 54, № 3. С. 283–300.
 9. *Одинцов С.Л.* Развитие и применение акустических средств диагностики атмосферного пограничного слоя // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 786–791; *Odintsov S.L.* Development and use of acoustic tools for diagnostics of the atmospheric boundary layer // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 104–108.
 10. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилимерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
 11. *Красненко Н.П., Тихомиров А.А.* Технические средства и технологии дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 1, № 1. С. 51–61.
 12. *Красненко Н.П., Кудрявцев А.Н., Раков Д.С., Стафеев П.Г.* Технические средства для исследования приземной атмосферы и распространения звуковых волн // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 158–164; *Krasenko N.P., Kudryavtsev A.N., Rakov D.S., Stafeyev P.G.* Equipment for studying surface atmosphere and acoustic wave propagation // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 304–310.
 13. *Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Влияние времени усреднения на качество восстановления характеристик мелкомасштабной ветровой турбулентности при акустическом зондировании // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10. С. 28–31.
 14. *Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижних слоях атмосферы по результатам акустического зондирования // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 228–232.
 15. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в нижней атмосфере // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 12. С. 101–106.
 16. *Красненко Н.П., Капегешева О.Ф., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Внешние масштабы температурной и динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 6. С. 57–62.
 17. *Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Оценка внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9/2. С. 254–255.
 18. *Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г.* Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 964–968.
 19. *Красненко Н.П., Тарасенков М.В., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика скорости ветра по результатам мини-содарных измерений // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 11. С. 77–83.
 20. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности по результатам акустического зондирования // Ученые записки физ. факультета МГУ. 2014. № 6. С. 146306-1–8.
 21. *Шаманаева Л.Г., Красненко Н.П., Капегешева О.Ф.* Суточная динамика среднеквадратичных отклонений трех компонент скорости ветра в пограничном слое атмосферы // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 12. С. 156–160.
 22. *Красненко Н.П., Капегешева О.Ф., Тарасенков М.В., Шаманаева Л.Г.* Пространственно-временная динамика дисперсии скорости ветра по результатам измерений мини-содаром // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8. С. 65–69.
 23. *Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г.* Содарные исследования пространственно-временной динамики нижнего слоя атмосферы // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 662. С. 146–151.
 24. *Шаманаева Л.Г., Потеекаев А.И., Красненко Н.П., Капегешева О.Ф.* Динамика кинетической энергии в атмосферном пограничном слое по результатам минисодарных измерений // Изв. вузов. Физика. 2018. Т. 61, № 12. С. 126–131.
 25. *Krasnenko N., Simakhin V., Shamanaeva L., Cherepanov O.* Robust nonparametric methods of statistical analysis of wind velocity components in acoustic sounding of the lower layer of the atmosphere // Symmetry. 2019. V. 11, is. 8. P. 961–974.
 26. *Способ* формирования направленного акустического излучения многоэлементными антенными решетками и устройство для его реализации: Пат. 2499302. Россия, МПК G10K 11/00 (2006.01). Красненко Н.П., Кудрявцев А.Н., Раков А.С., Раков Д.С., Сандуков Ц.Д., Стафеев П.Г.; ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук. № 2012121225/28; Заявл. 23.05.2012; Оpubл. 20.11.2013. Бюл. № 32.
 27. *Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С., Шендрик Д.А.* Акустическая антенная решетка с электронным управлением лучом диаграммы направленности // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2013. Т. 29, № 3. С. 53–57.
 28. *Кузьмин А.А., Раков А.С., Шеин И.Ю.* Разработка мобильного акустического локатора на фазированной антенной решетке для зондирования атмосферы // Сб. избранных статей научной сессии ТУСУР. 16–18 мая 2018 г. Томск: В-Спектр. Ч. 1. 2018. С. 32–34.
 29. *Красненко Н.П., Раков А.С., Раков Д.С.* Мощные акустические антенные решетки для атмосферных приложений // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 90–97.
 30. *Rakov D.S., Rakov A.S., Kudryavtsev A.N., Krasnenko N.P., Chursin Y.A., Murin M.A.* A study of directional patterns of ultrasonic parametric array // Arc. Acoust. 2019. V. 44, N 2. P. 301–307.
 31. *Способ* защиты акустических параболических антенн от снега и наледи и устройство его реализации: Пат. 2683131. Россия, МПК H01Q 1/02 (2006/01)/ Красненко Н.П., Кудрявцев А.Н., Раков А.С., Раков Д.С.; ФГБОУ ВО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2018100438; Заявл. 09.01.2018; Оpubл. 26.03.2019. Бюл. № 9.
 32. *Красненко Н.П., Клименко А.Н., Раков А.С.* Аппаратно-программный комплекс акустического мониторинга метеорологической обстановки на ограниченной территории // Ученые записки физ. факультета МГУ. 2014. № 6. С. 6.
 33. *Karpushin P.A., Krasnenko N.P., Popov Yu.V., Popova A.I., Popova K.Yu., Rakov A.S., Rakov D.S.* Hardware-software complex of acoustic monitoring of meteorological fields in the atmospheric boundary layer

- // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 211, N 012076. P. 1–10.
34. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 35. Zuev S.V., Krasnenko N.P. Simplified method for monitoring of cumulus clouds using global horizontal irradiance // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 386. P. 012044.
 36. Красненко Н.П., Попов Ю.Б., Карпушин П.А., Кураков С.А., Раков А.С. Использование метеорологических беспилотных летательных комплексов мультиторного типа для верификации радиометрических измерений температурного профиля атмосферы // Вторая междунар. науч. конф. «Шарьгинские чтения». Томск: Изд-во ТУСУР. 2020. С. 69–75.
 37. Красненко Н.П., Раков Д.С., Раков А.С. Исследование характеристики направленности параметрической антенной решетки // Тр. XXXII сессии Российского акустического общества. Москва. АКИН. «GEOS». 2019. Секция НА. С.1053–1060.
 38. Zakharov F.N., Filimonov V.A., Krasnenko N.P., Anikin A.S. Estimation of the relative humidity in the troposphere using GNSS signals // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1499, N 012017. 4 p.
 39. Попов Ю., Лавриненко А., Красненко Н., Попова А., Попова К., Шелупанов А. Comparative evaluation of spatial interpolation of atmospheric state parameters based on a dynamic stochastic model taking into account the vertical variation of a meteorological field // Symmetry. 2019. V. 11, is. 10. P. 1207–1219.
 40. Karpushin P.A., Popov Yu.B., Popova A.I., Popova K.Yu., Krasnenko N.P., Lavrinenko A.V. Statistical analysis of experimental data for mathematical modeling of physical processes in the atmosphere // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 96, N 012010. 5 p.
 41. Абрамочкин В.Н., Красненко Н.П. Возможности исследования и прогнозирования мезомасштабных метеорологических полей в пограничном слое атмосферы // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 653. С. 7–10.
 42. Банах В.А., Фалиц А.В., Сухарев А.А., Красненко Н.П., Раков А.С. Вариации температурного режима пограничного слоя атмосферы в регионах с различной орографией // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 734–742.
 43. Zhukova V.A., Krasnenko N.P., Loginov S.V., Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Rakov A.S. Spatial-temporal variability of the temperature stratification of the lower atmosphere layer during the development of abnormally early thunderstorms and squalls // Proc. SPIE. 2020. N. 11560. 5 p. DOI: 10.1117/12.2575557.

N.P. Krasnenko. Development of remote techniques and instruments for investigation of the lower atmosphere at IMCES SB RAS.

The results of works on the development and use of remote sensing instrumentation for monitoring of the meteorological state of the atmosphere at IMCES SB RAS are considered including, first of all, instruments for active acoustic sounding together with radiometric (passive) instruments for monitoring the temperature and wind structure, turbulence characteristics in the lower atmosphere, and moisture content in the troposphere. A hardware-software complex for monitoring and forecasting the state of the atmosphere over Tomsk and its vicinity and remote sounding stations distributed over the territory under study (test site) are described.