

УДК 551.501:681.2.08

Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН

А.А. Тихомиров¹, В.А. Корольков¹, С.В. Смирнов¹, А.А. Азбукин¹,
А.Я. Богушевич¹, В.В. Кальчихин¹, А.А. Кобзев¹, С.А. Кураков¹,
А.Е. Тельминов¹, В.Ю. Богомолов¹, М.М. Кабанов¹, С.Н. Капустин¹,
И.А. Репина², А.Д. Пашкин², В.М. Степаненко^{3*}

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

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

Представлены сведения об организации и истории развития метеорологических наблюдений в ИМКЭС СО РАН, которые начались на открытой в 1994 г. метеостанции II разряда КТИ НП «Оптика» и продолжают в настоящее время в Геофизической обсерватории ИМКЭС. Показана ретроспектива развития метеорологического приборостроения в Институте от создания экспериментальных образцов автоматизированных комплексов для оперативного измерения оптико-метеорологических характеристик атмосферы (70–80-е гг. XX в.) при испытаниях различных лазерных систем до разработки и создания ряда метеорологических приборов, включая ультразвуковые автоматические метеостанции различного назначения и территориально распределенные информационно-измерительные системы на их основе. Некоторые разработанные метеостанции занесены в Госреестр средств измерений.

Ключевые слова: метеорологические наблюдения, метеорологические приборы, ультразвуковые метеостанции, информационно-измерительные системы; meteorological observations, meteorological instruments, ultrasonic weather stations, information-measuring systems.

Введение

Основная составляющая мониторинга окружающей среды — наблюдения. ВМО отмечает, что «наблюдения обладают основополагающим значением для нашего понимания того, каким образом система Земли: ее атмосфера, океаны, пресноводные водоемы, суша и биосфера — формирует погоду, климат и гидрологические условия» [1]. В свою очередь, количество и качество получаемых данных

неразрывно связаны с уровнем развития технического и технологического обеспечения этих наблюдений.

ИМКЭС СО РАН (далее ИМКЭС), ведущий свою историю с 1972 г., когда было организовано Специальное конструкторское бюро научного приборостроения (СКБ НП) «Оптика» СО АН СССР, в 1972–1992 гг. осуществлял главным образом приборное обеспечение фундаментальных исследований атмосферной оптики [2–4]. На этом этапе также разрабатывались новые технические средства: оптико-метеорологические системы и комплексы для сопровождения полигонных испытаний специальных лазерных систем; лидары наземного, самолетного и космического базирования и другие приборы для экологического и метеорологического мониторинга окружающей среды [2, 4]. В настоящее время создание новых автоматических метеорологических станций (АМС) и систем, использующих акустические и оптические методы измерений, остается приоритетным научно-техническим направлением Института в связи с недостаточным обеспечением сети постов Росгидромета современными приборами и оборудованием отечественного производства.

* Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru); Владимир Александрович Корольков (kor@imces.ru); Сергей Васильевич Смирнов (smirnov@imces.ru); Александр Анатольевич Азбукин (per@imces.ru); Александр Яковлевич Богушевич (bay@imces.ru); Владимир Викторович Кальчихин (vvk@imces.ru); Алексей Анатольевич Кобзев (kaa@imces.ru); Сергей Анатольевич Кураков (sergeykurakov@gmail.com); Алексей Евгеньевич Тельминов (talexey@imces.ru); Василий Юрьевич Богомолов (verminrus@mail.ru); Михаил Михайлович Кабанов (mike.kabanov@gmail.com); Сергей Николаевич Капустин (skm@imces.ru); Ирина Анатольевна Репина (repina@ifaran.ru); Артем Денисович Пашкин (artem.ifa64@gmail.com); Виктор Михайлович Степаненко (vstepanenkomeister@gmail.com).

Собственные метеорологические наблюдения в Институте начали проводиться после того, как его возглавил чл.-корр. РАН М.В. Кабанов в ноябре 1992 г. Он сформулировал концепцию регионального климато-экологического мониторинга Сибири [5], которая стала главным научным направлением для Института с 1992 г. по настоящее время [3, 4]. Для реализации этой концепции в Институте в 1994 г. при поддержке Западно-Сибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЗСУГМС) была создана метеостанция II разряда, на которой начались метеорологические наблюдения. С 2007 г. наблюдения продолжаются в Геофизической обсерватории (ГО), оснащенной большим количеством как стандартных, так и созданных в Институте измерительных средств. Разрабатываемое в ИМКЭС оборудование используется во многих научных и образовательных учреждениях и ведомствах страны, включая Росгидромет и Минобороны России, для проведения атмосферных исследований и метеорологических наблюдений.

В настоящей статье представлены основные результаты работ по развитию метеонаблюдений и созданию приборов для метеорологического мониторинга в ИМКЭС, от экспериментальных образцов до выпуска сертифицированных серийных изделий с помощью индустриального партнера — ООО «Сибаналитприбор».

1. Метеорологические наблюдения в ИМКЭС СО РАН

1.1. Организация метеорологической станции в КТИ НП «Оптика»

В 1992 г. СКБ НП «Оптика» перешло в новый статус — Конструкторско-технологический Институт научного приборостроения (КТИ НП) «Оптика». Тогда академик В.Е. Зуев поставил перед вновь назначенным директором КТИ чл.-корр. РАН М.В. Кабановым задачу сформировать самостоятельное научное направление [3]. До этого в Институте решались задачи конструкторско-технологического обеспечения фундаментальных исследований по атмосферной оптике и создания экспериментальных приборов и устройств по хозяйственным договорам ИОА СО РАН (далее ИОА) [2]. Основываясь на решениях конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро [6], М.В. Кабанов выбрал основным направлением научной деятельности КТИ фундаментальные и прикладные исследования региональных климато-экологических процессов в окружающей среде [3, 4]. Для развития этого направления в марте 1993 г. было подписано Соглашение между Президиумом СО РАН и Администрацией Томской области о совместной поддержке региональной научно-технической программы «Климато-экологический мониторинг Сибири» на территории Томской области [3]. Концепция этой программы изложена в [5]; в ней для информационно-аналитического обеспечения мо-

нитинга предлагалось, в частности, организовать метеорологические наблюдения на базе стационарного пункта (метеостанции) в восточной части Томского Академгородка на территории базового экспериментального комплекса ИОА и КТИ НП «Оптика».

После обращения М.В. Кабанова руководством ЗСУГМС было принято решение оказать содействие и помощь в укомплектовании и установке приборов и оборудования на метеорологической площадке создаваемой метеостанции. 6 октября 1994 г. была официально открыта ведомственная метеостанция II разряда «Томск КТИ «Оптика»» (акт ЗСУГМС от 6.10.1994 г.). Начальником станции был назначен В.Н. Генин, имевший большой опыт работы в гидрометеослужбе в Арктике.

Метеостанция стала частью Климато-экологической обсерватории, в которой помимо метеонаблюдений проводились также наблюдения за атмосферным электричеством и УФ-радиацией. В 2002 г. обсерватория получила статус структурного подразделения ИМКЭС — стала Сибирской климато-экологической обсерваторией (СКЭО).

Обсерватория продолжила проводить регулярные метеорологические, актинометрические, в том числе УФ-метрические, и атмосферно-электрические наблюдения, измерения общего содержания озона и приземных концентраций некоторых малых газовых составляющих атмосферы, а также исследования в области атмосферной акустики. С ее помощью удавалось обеспечивать необходимыми данными исследования климатических изменений и загрязнения окружающей природной среды в региональном, мезо- и микромасштабах, их экологических последствий. На базе обсерватории начали проводиться испытания новых приборов, методик и технологий, предназначенных для климато-экологического мониторинга, а студенты томских университетов стали проходить учебные практики.

1.2. Геофизическая обсерватория (2007 г. — настоящее время)

В 2006–2007 гг. территория, на которой располагалась метеостанция, была передана в состав Особой экономической зоны г. Томска, и метеорологические наблюдения были продолжены на площадке непосредственно на территории Института. Преемником СКЭО стала ГО ИМКЭС, открытая 23 марта 2007 г.

В настоящее время ГО ИМКЭС [6] — стационарный пункт наблюдений за состоянием окружающей среды, полигон для экспериментальных геофизических, метеорологических и экологических исследований, испытаний и сравнений технических характеристик новых приборов и технологий климато-экологического мониторинга, разработанных как в ИМКЭС, так и в других учреждениях. Оборудование ГО используется для проведения учебных исследовательских и практических работ школьников, студентов и аспирантов НИ ТГУ и НИ ТПУ.

В обсерватории проводятся инструментальные и визуальные метеорологические, спектрофотометрические (актинометрические), атмосферно-электрические, аэрозольные спектрометрические, газоаналитические, дозиметрические и радиометрические наблюдения [8] в непрерывном либо периодическом режиме в зависимости от вида наблюдений и решаемых задач.

Обсерватория является неофициальным пунктом наблюдений Росгидромета за общим содержанием озона и УФ-излучением, результаты которых ежедневно передаются в ГГО им. А.И. Воейкова и ЦАО Росгидромета, а затем поступают в мировой центр данных в Канаде. Данные метеонаблюдений ГО активно используются в лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА и лаборатории биоинформационных технологий ИМКЭС.

Инфраструктура ГО [7] располагается на территории и в зданиях ИМКЭС. Она включает в себя две основные наблюдательные площадки, несколько лабораторных помещений с измерительно-регистрирующей аппаратурой и приборами для камеральной обработки материалов полевых (экспедиционных) исследований. Кроме того, на базе обсерватории отрабатываются методики измерений и проводятся эксперименты по аэрологическому зондированию пограничного слоя атмосферы с использованием доплеровского содара, привязного змейкового аэростата и беспилотного летательного аппарата (БПЛА) коптерного типа, а также ведутся совместно с ТПУ экспериментальные исследования динамики характеристик естественной радиоактивности и ионизирующих излучений атмосферы и почвы.

1.3. Исследование турбулентной структуры ветрового потока внутри городской застройки по данным измерений в Геофизической обсерватории

В 2019 г. в ГО ИМКЭС по инициативе и с участием сотрудников МГУ и ИФА РАН начал работу автоматизированный информационно-измерительный метеорологический комплекс. Его основное назначение – получение данных о температуре воздуха, скорости и направлении ветра, включая его вертикальную составляющую, с высоким временным разрешением (до 80 Гц), необходимых для изучения атмосферной турбулентности приземного слоя атмосферы в условиях сильно пересеченной местности. Это так называемый городской каньон, представленный элементами городской разновысотной застройки и небольшими лесными участками с высокими (до 30 м) деревьями. В состав комплекса вошли семь метеостанций АМК-03 (см. подраздел 2.3), территориально разнесенных на 20–30 м и размещенных на разных высотах (от 2 до 28 м) [9].

Проведенные эксперименты позволили уточнить теорию подобия Монина–Обухова (ТПМО), которая предполагает подстилающую поверхность с однородным распределением аэродинамической и температурной шероховатости, а также стационарность тур-

булентных потоков по горизонтали и в приземном слое атмосферы [10]. Над неоднородными ландшафтами эти условия нарушаются [11]. В ТПМО рассматриваются связи между первыми и вторыми статистическими моментами термогидродинамических величин, в то время как в неоднородном ландшафте значительную роль в формировании турбулентного режима играют так называемые когерентные структуры, при наличии которых возникает связь между вторыми и третьими моментами [12, 13]. Предполагается, что в однотипных неоднородных ландшафтах, например в городских каньонах, существуют универсальные формы зависимостей между статистическими моментами метеовеличин, в которых безразмерные константы могут быть связаны с геометрическими параметрами конкретной местности. Выявление таких зависимостей способствует разработке новых методов параметризации обмена импульсом и скалярными характеристиками между неоднородной поверхностью и атмосферой.

Для описания когерентных структур в атмосферном пограничном слое (АПС) в [13, 14] предложена так называемая бимодальная модель с параметризацией потока потенциальной температуры $\overline{w'w'\theta'}$ по типу конвективной адвекции (здесь и далее черта над символами означает временное усреднение). Третьи моменты $\overline{(w')^3}$ и $\overline{w'w'\theta'}$ связаны с потоком потенциальной температуры $\overline{w'\theta'}$ и, следовательно, с вертикальным потоком явного тепла через соотношение

$$\overline{w'w'\theta'} = C_w S_w \sqrt{\overline{(w')^2}} \overline{w'\theta'}, \quad (1)$$

где $S_w = \overline{(w')^3} / [\overline{(w')^2}]^{3/2}$ – коэффициент асимметрии распределения вертикальной скорости ветра; C_w – безразмерный коэффициент. Третьи моменты вычисляются по измерениям высокочастотных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра w' и потенциальной температуры θ' .

В [12] экспериментально показано, что такая параметризация третьих моментов может быть применена и для устойчивого АПС при взаимодействии набегающего потока с сильно неоднородным ландшафтом на примере лесной поляны. Если значения S_w по данным пульсационных измерений окажутся порядка единиц, то это будет свидетельствовать о наличии когерентных структур (крупных вихрей) и их определяющего вклада в вертикальные турбулентные потоки.

В качестве примера ниже представлены результаты измерений АМК-03, расположенных в ГО ИМКЭС [9, 15], в условиях, подобных городскому каньону, на трех высотах (2, 10 и 28 м). По направлению ветра выделены два режима (рис. 1, 2, цв. вкладка): при натекающем потоке с северо-западного направления ($300^\circ \pm 30^\circ$), идущем через препятствие (разновысотные корпуса ИМКЭС), наблюдается поворот ветра на высоте 2 м относительно

натекающего потока почти на 90° (режим 1); при натекающем потоке с юга ($190^\circ \pm 20^\circ$), идущем без препятствия, поворота ветра на высоте 2 м не наблюдается (режим 2).

Выявлены следующие закономерности: всплеск третьего момента $\overline{w'w'T'}$ (потока явного тепла) в отрицательную область на высоте 10 м при наличии поворота ветра на высоте 2 м на фоне суточного хода $\overline{w'w'T'}$; всплески $\overline{w'w'T'}$ на высоте 2 м в разы меньше по абсолютному значению, чем на 10 м. Это можно объяснить явлением адвекции, наблюдаемым на высоте 10 м за препятствием. Но на высоте 2 м переноса тепла уже нет. В суточном ходе вертикального потока явного тепла при разных режимах не наблюдается значительных различий.

На рис. 2 (цв. вкладка) показано распределение C_w для двух вышерассмотренных режимов ветровых потоков. У безразмерного коэффициента C_w в режиме 1 более выражен максимум распределения на высоте 10 м, где область максимума распределения находится в интервале 3 ± 1 , содержащем 50% значений. А в режиме 2 на высоте 10 м область максимума распределения, находящаяся в равном по ширине интервале 1 ± 1 , содержит 31% значений. Более подробный анализ приведен в [15].

Таким образом, была подтверждена возможность применения параметризации третьего момента $\overline{w'w'\theta'}$ для условий городского каньона. Экспериментально показано, что во внутренней области приземного слоя на высоте 10 м третий момент $\overline{w'w'\theta'}$ выражается через поток потенциальной температуры $\overline{w'\theta'}$ с распределением C_w , свидетельствующим о наличии когерентных структур.

Осенью 2021 г. на границе лесного массива ГО была установлена 40-метровая мачта (вместо 28-метровой), что позволит получать более репрезентативные данные о набегающем ветровом потоке и проводить градиентные метеорологические, радиационные и газоаналитические измерения над и внутри лесного полога в условиях «городского каньона».

2. Приборное обеспечение метеорологических наблюдений

2.1. Метеорологическое обеспечение полигонных испытаний (1972–1987 гг.)

Одной из главных научно-технических задач, поставленных при организации Института (тогда СКБ НП «Оптика» СО АН СССР), было создание комплексов аппаратуры для дистанционного оперативного определения параметров атмосферы с применением лазерных источников [2]. В состав автоматизированных комплексов входили оптико-электронные приборы, измеряющие наклонную прозрачность атмосферы (лидар), горизонтальную прозрачность, атмосферную рефракцию, структурную постоянную флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , а также ЭВМ для автоматизирован-

ной обработки результатов измерений и управления работой перечисленных измерителей [16, 17]. Также в комплексы включались многоуровневые метеостанции, измеряющие основные метеорологические величины: скорость и направление ветра, атмосферное давление и относительную влажность на двух уровнях (2 и 10 м). В них использовались стандартные метеодатчики, которые выпускались тогда советской промышленностью. Всего было разработано и изготовлено около десятка модификаций комплексов (АОИПА – аппаратура для оперативного измерения параметров атмосферы, СОИПА – система оперативного измерения параметров атмосферы, и др.), которые были установлены на полигоны МО СССР, для оптико-метеорологического обеспечения испытаний и корректировки характеристик лазерных локационных и силовых систем, работающих в атмосфере [17].

2.2. Метеорологическое приборостроение в 1990-е гг.

В связи с конверсией оборонной промышленности СССР в конце 80-х – начале 90-х гг. XX в. в России было практически прекращено производство метеорологических приборов. Поэтому в Институте был налажен мелкосерийный выпуск простейших гидрометеорологических приборов: флюгер Вильда, лебедка гидрометрическая, метеорологические мачты различных типов и др., которые поставлялись на метеостанции Росгидромета. Одновременно с этим началась разработка новых приборов, использующих акустические и оптические методы для измерения метеорологических величин: оптический измеритель влажности воздуха [18], ультразвуковые термоанемометры [19], оптический осадкомер [20], корабельный измеритель метеорологической дальности видимости [21] и др.

2.3. Ультразвуковые термоанемометры и метеостанции на их основе

Основные достоинства акустического (ультразвукового) метода измерений параметров ветра [22] – это высокая чувствительность и малая инерционность измерений (частота определения мгновенных значений скорости ветра может достигать 200 Гц), а также определение турбулентных характеристик атмосферы и возможность получения дополнительной информации о скорости распространения звука и пульсаций температуры воздушного потока. В конструкции приборов, использующих этот метод, отсутствуют механические вращающиеся элементы.

Первая модификация экспериментального образца ультразвукового термоанемометра (УТА) оригинальной конструкции, предназначенного для измерения мгновенных значений температуры и трехкомпонентного вектора скорости ветра с частотой до 10 Гц, была разработана в Институте в 1996 г. [2, 19].

На основе этого УТА были созданы ультразвуковая автоматическая метеостанция (УАМС) АМК-03 и ее модификации, конструкция и технические характеристики которой представлены в [22–26]. Разработано специальное программное обеспечение для УАМС [27]. В этой конструкции УТА расстояние между электроакустическими преобразователями (ЭАП) (излучателями и приемниками ультразвуковых волн) составляет ~145 мм. Жесткость конструкции УТА обеспечена тем, что арматура, на которой размещены ЭАП, представляет собой два трубчатых кольца, ориентированных вертикально относительно горизонта и ортогонально друг к другу. На этих кольцах закреплены корпуса восьми ЭАП [23].

УАМС АМК-03 занесена в Госреестр средств измерений (свидетельство RU.C.28.007.A № 29530 от 15.05.2013) и серийно выпускается промышленным партнером Института – ООО «Сибаналитприбор». В настоящее время УАМС модифицирована как АМК-04 с расширением диапазона измерения скорости ветра до 40 м/с (свидетельство об утверждении типа средств измерений ОС.С.28.001.A № 77356 от 1.06.2020). Метрологическое обеспечение УАМС АМК-03 и АМК-04 осуществляется в соответствии с рекомендациями из [28]. По программе «Импортозамещение» для институтов СО РАН было изготовлено более 10 различных модификаций метеостанций на основе УАМС АМК-03. Также созданы переносные и мобильные модификации УАМС для метеообеспечения действий различных видов Вооруженных сил РФ под индексами

1Б65 и 1Б65Б [29] (свидетельство об утверждении типа средств измерений № 31023-11 от 15.09.2021).

Последней модификацией созданных УАМС является новый аппаратно-программный комплекс ГОР-3/1м для измерения турбулентных характеристик метеорологических полей [30], созданный по заказу ИОА (рис. 3). В этой конструкции используются четыре новых УТА УАМС-75, у которых расстояние между ЭАП уменьшено до 75 мм, что позволяет регистрировать мелкомасштабные турбулентные неоднородности. Комплекс измеряет флуктуации температуры и компонент скорости ветра в четырех пространственно разнесенных на 30 ± 35 см областях в атмосфере. Он определяет не только стандартные параметры атмосферной турбулентности в каждой отдельной области измерений, но и статистические характеристики мгновенных пространственных производных турбулентных пульсаций вдоль каждой из осей декартовой системы координат. В УТА этой модификации используются современные микросхемы и процессор, а также новое ПО (МЕТЕО 4.0).

2.4. Метеостанции на летательных аппаратах

Для измерения контактным методом пространственно-временных вариаций полей температуры, атмосферного давления и влажности воздуха разработан экспериментальный образец портативной электронной метеостанции (ПЭМС), размещаемой на БПЛА (тексакоптере DJI модель S900) [31, 32].

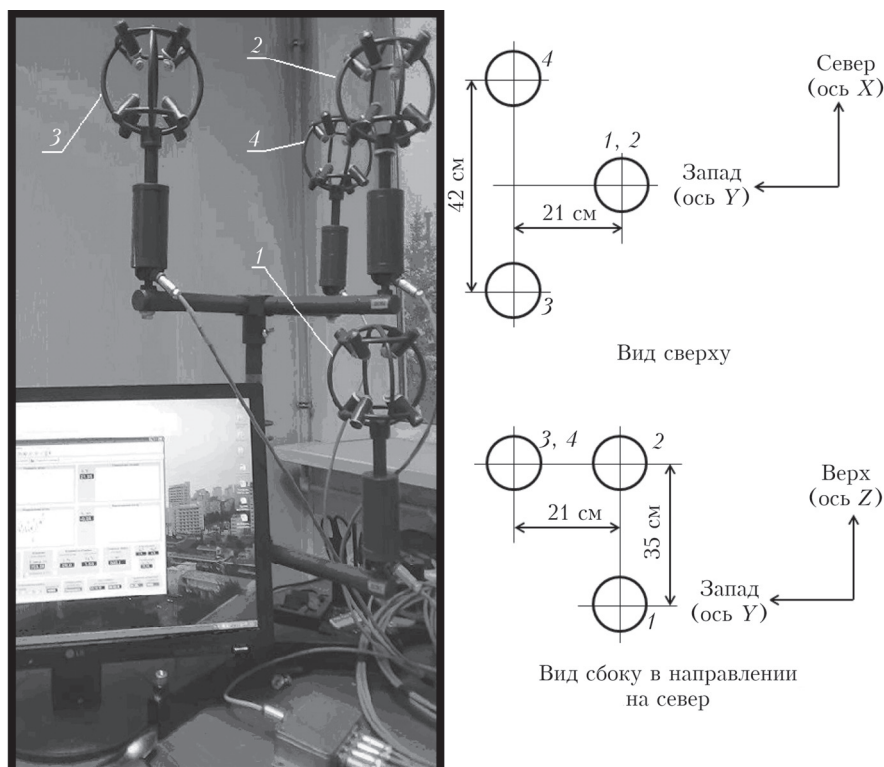


Рис. 3. Внешний вид комплекса ГОР-3/1м и схема размещения в нем УТА УАМС-75, позиции которых обозначены цифрами 1–4

В ПЭМС использованы малоинерционные электронные датчики для измерения перечисленных метеовеличин. Данные измерений ПЭМС передаются по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц на наземный ноутбук. Датчики температуры и влажности размещались на высоте ~0,5 м над плоскостью вращения винтов БПЛА, чтобы уменьшить влияние их воздушных потоков на результаты измерений. Гексакоптер обеспечил измерение вертикальных профилей метеовеличин до высоты ~2 км с разрешением 10–15 м, которое зависело от скорости подъема БПЛА и постоянной времени метеодатчиков. Кроме того, была разработана модификация УАМС, размещаемая на привязном аэростате (ПУМС-БПЛА), способном подниматься на высоту до 1 км [32–34].

2.5. Оптический осадкомер

Актуальная задача приборного обеспечения метеонаблюдений – автоматизированное получение информации о выпадающих атмосферных осадках. Работа по созданию прибора, обеспечивающего получение данных о распределении частиц по размерам и скоростям падения, чтобы на их основе рассчитывать интенсивность и количество осадков, определять их вид и продолжительность выпадения, ведется в Институте с 2009 г. Созданы двухканальные и одноканальные экспериментальные образцы осадкомеров [35, 36], работа которых основана на принципе получения и анализа теневых изображений частиц осадков. Разработаны конструкция, программное обеспечение, а также простая и оригинальная процедура калибровки прибора ОПТИОС, которая обеспечивает высокую точность измерений [37]. Натурные испытания прибора проводятся в непрерывном режиме [38].

Применение осадкомера ОПТИОС для определения микроструктурных и интегральных характеристик осадков позволило провести анализ изменчивости параметров электрического состояния приземного слоя атмосферы во время ливней [38, 39], а также получить результаты мониторинга амбиентного эквивалента дозы γ -излучения и плотности потока β -излучения во время дождя [40, 41].

2.6. Информационно-измерительные системы на основе УАМС и их программное обеспечение

Следуя концепции М.В. Кабанова [5, 42], в конце 2000-х гг. в Институте начали разрабатываться информационно-измерительные системы (ИИС) для обнаружения опасных метеорологических явлений (ОМЯ) в регионе [43]. Основу инструментальной части ИИС составляли территориально разнесенные на несколько десятков километров посты УАМС АМК-03, установленные на мачтах, и коммутационные контроллеры для передачи измеряемых метеорологических величин [44] по сети Ethernet или GPRS-каналу на сервер на территории Института [45, 46]. На сервере создавалась информаци-

онная база с высокой частотой обновления данных. Места для размещения постов УАМС выбирались по нескольким критериям: 1) нахождение в розе основных ветров Томской области; 2) близость расположения к стационарным источникам питания; 3) возможность использования сотовой связи для передачи данных с постов на сервер; 4) вандалозащищенность мест размещения аппаратуры.

Для прогнозирования метеорологических процессов использовались мезомасштабная модель WRF и разработанный метод краткосрочного прогноза, основанный на применении алгоритмов калмановской фильтрации измеряемых АМК-03 метеовеличин [45]. Получены предварительные результаты работы модели WRF при усвоении непрерывных значений температуры и горизонтальных компонент скорости ветра, поступающих с постов УАМС.

Результаты работы одного из вариантов такой системы представлены в [47, 48]. Проведена сравнительная оценка результатов измерений давления, температуры, скорости и направления ветра на постах АМС, расположенных на территории ИМКЭС, в аэропорту Богашево, на стационаре в с. Курлек и в с. Половинка (на р. Оби). Рассчитаны автокорреляционные функции измеряемых метеовеличин для применения статистической интерполяции-экстраполяции этих величин на территорию между постами ИИС. Было показано, что требуется предварительная обработка метео данных и их статистическая обработка на постах измерений для уменьшения используемого трафика сотовой связи при передаче данных на сервер ИИС.

Дальнейшее развитие ИИС заключалось в разработке и создании измерительно-вычислительной системы (ИВС) для реализации технологии мезомасштабного мониторинга состояния атмосферного пограничного слоя [49, 50] (2014–2016 гг.). На рис. 4 приведена конфигурация этой ИВС, которая включала стационарный и мобильный измерительные комплексы. Стационарный комплекс состоял из четырех территориально разнесенных многоуровневых мачт (МУМК) с размещенными на них АМК-03 (на уровнях 2, 10 и 30 м), датчиков температуры почвы ДТП-01 и датчиков радиационного фона. Вся информация, получаемая с перечисленных датчиков, поступала на контроллер сбора и предварительной обработки информации (КСОД), использующий промышленный компьютер, на котором производилась предварительная обработка полученных данных и вычислялись метеовеличины и их корреляционные моменты. Такой подход позволил уменьшить интернет-трафик для информации, передаваемой в центр обработки данных (ЦОД) (внешний сервер с соответствующим программным обеспечением).

Мобильный комплекс (МИК) включал: двухуровневую метеосистему (ДУМК), размещенную на крыше автомобиля; летающие метеостанции ПЭМС-БПЛА и ПУМС-БПЛА, описанные в подразделе 2.4; многокомпонентную оптическую систему

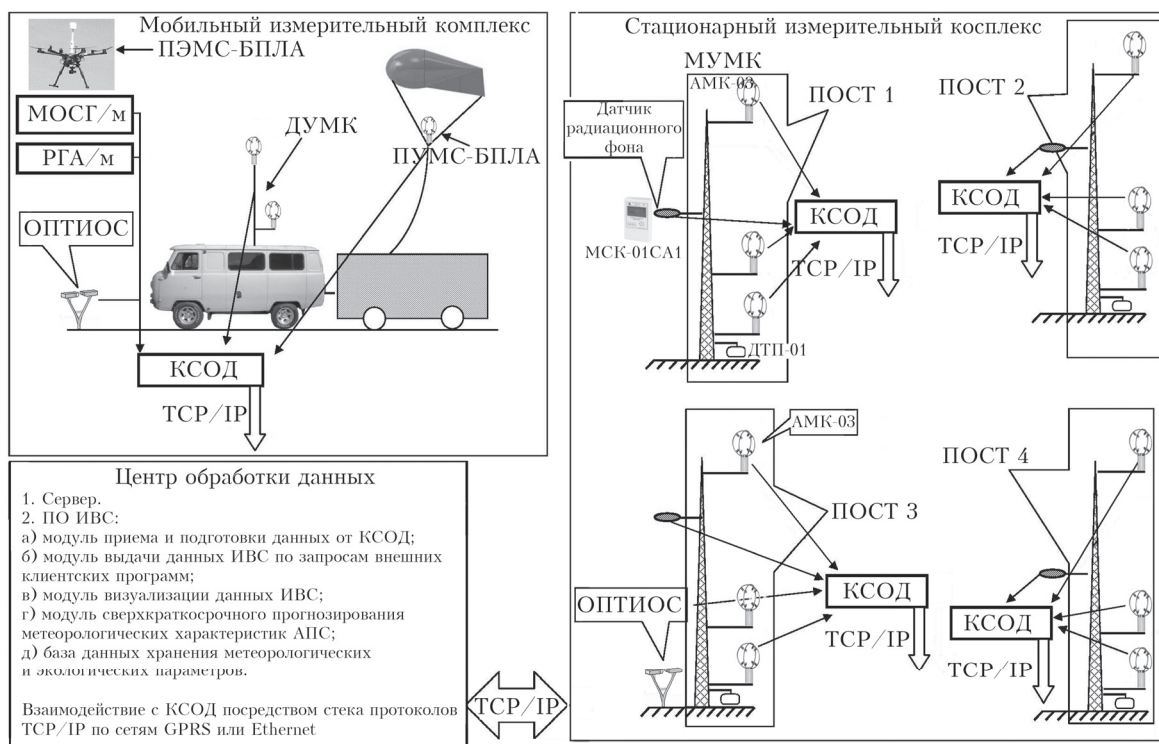


Рис. 4. Конфигурация измерительно-вычислительной системы

газоанализа (МОСГ/м) [51] и переносной измеритель концентрации паров ртути РГА/м [52]. Получаемая с устройств МИК информация также через КСОД передавалась в ЦОД. Состав метеодатчиков МУМК обеспечивал вычисление энергических и спектральных параметров турбулентности в АПС [33, 50], используемых для определения типа атмосферной стратификации (конвекция/инверсия/нейтральная) и восстановления вертикальных профилей температуры, скорости ветра, давления и влажности на высотах до несколько десятков или сотен метров (в зависимости от выявленной стратификации) [53].

2.7. АМС «АрктикМетео»

В 2020 г. завершены разработка и изготовление экспериментального образца автономной АМС «АрктикМетео», которая предназначена для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями [54]. АМС обеспечивает измерение метеорологических величин, входящих в основной перечень Росгидромета: температура воздуха ($-60... +55$ °С), скорость ($0,1... 60$ м/с) и направление ветра ($0... 360^\circ$), относительная влажность воздуха ($15... 100\%$), атмосферное давление ($520... 800$ мм рт. ст.), температура подстилающей поверхности ($-60... +55$ °С) и количество жидких атмосферных осадков ($0... 500$ мм). Кроме этого, АМС измеряет ряд метеовеличин из дополнительного перечня: высоту снежного покрова ($2... 100$ см), величину приходящей солнечной радиации ($0,1... 1,6$ кВт/м²) и профиль темпе-

ратуры почвы ($-50... +55$ °С) на глубинах от 10 до 100 см с шагом 10 см.

В метеорологических датчиках использованы оптические, акустические и электронные методы измерений. Сигналы с датчиков, измеряющих метеорологические величины, поступают в систему сбора, усвоения и передачи данных, которая пакетирует их соответствующим образом и передает на хранение на внешний сервер. Измерительная информация передается в автоматическом режиме с периодом, устанавливаемом пользователем, либо в режиме «по запросу пользователя», по кабельному каналу, каналам сотовой и спутниковой связи. Автономность работы АМС (до одного года) обеспечивается комбинированной системой электропитания, состоящей из аккумуляторов, солнечных панелей и генератора на топливных элементах (метанол). В состав АМС также входят сервисные системы, обеспечивающие в автоматическом режиме непрерывный контроль функционирования датчиков измерения метеорологических величин и их автоматической калибровки [54, 55]. Внешний вид вандализационно защищенной конфигурации АМС и результаты натурных испытаний в течение 2020–2021 гг. приведены в [56].

Данная разработка является универсальным решением различных задач метеорологического обеспечения на удаленных территориях в сложных климатических условиях. Модификация АМС «АрктикМетео» положена в основу прототипа стационарного пункта контроля программно-аппаратного комплекса для мониторинга и прогнозирования экологической обстановки на городских и промышленных объектах (ОКР «Палантир»).

Заключение

Показана история развития и некоторые результаты метеорологических наблюдений в ИМКЭС СО РАН. Описаны созданные приборы и их комплексы. Геофизическая обсерватория служит стационарным пунктом наблюдений за состоянием окружающей среды, полигоном для экспериментальных геофизических, метеорологических и экологических исследований, проведения испытаний и сравнений технических характеристик новых приборов и технологий мониторинга, разработанных как в ИМКЭС, так и в других учреждениях. Совместно с сотрудниками ИФА РАН и МГУ проведено уникальное исследование турбулентной структуры ветрового потока внутри городского каньона, для которого использовано семь УАМС АМК-03, размещенных в ГО на высотах 2, 10, 28 м на расстояниях до 30 м друг от друга. При измерениях высокочастотных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра w' и потенциальной температуры θ' определены потоки тепла и третьи моменты $(w')^3$ и $w'\theta'$ на разных высотах каньона в зависимости от направления ветра.

Разрабатываемые в Институте АМС и их составные части, основанные на акустических и оптических методах измерений, дорабатываются до опытных образцов, сертифицируются и выпускаются серийно с помощью индустриального партнера. На основе УАМС АМК-03 создано несколько модификаций информационно-измерительных систем с территориально разнесенными многоуровневыми пунктами измерений. Эти ИИС стали основой для создания «штормового кольца» вокруг г. Томска. Разработана вандалозащищенная конструкция автономной АМС, работающей на удаленных территориях и измеряющей основные метеорологические величины, входящие в основной перечень Росгидромета, а также ряд дополнительных величин. АМС снабжена комбинированной системой электропитания, обеспечивающей ее автономную работу до 1 года, и системой передачи информации на удаленный сервер по кабельному каналу, каналам сотовой и спутниковой связи.

Контрольно-испытательная станция Института, включающая климатические камеры, камеры давления и влаги, аэродинамическую трубу, стенды для механических воздействий на приборы и др., позволяет проводить испытания опытных образцов создаваемых приборов и оборудования на требования соответствующих ГОСТов. Сертифицированное метеорологическое оборудование ГО делает возможными длительные натурные испытания опытных образцов в различных погодных условиях.

Перечисленные НИОКР выполнены в течение 50 лет как по планам РАН и СО РАН и по договорам, так и по госзаданиям ФАНО России и Минобрнауки России, а также по проектам РФФИ (№ 16-45-700562 р_а, № 09-05-99014-р_офи и № 11-05-98062-р_сибирь_а), ФЦП «Исследо-

вания и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 гг.» (соглашения от 5.06.2014 г. № 14.607.21.0030 и от 15.05.2018 г. № 14.607.21.0205), гранта РНФ № 21-17-00249.

В настоящее время метеорологические, спектрофотометрические и атмосферно-электрические наблюдения в геофизической обсерватории выполняются в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (№ 121031300154-1), экспериментальные исследования атмосферной турбулентности с использованием мачтовых измерений проводятся при финансовой поддержке РНФ (№ 21-17-00249), инструментальные и визуальные наблюдения за облачностью – РНФ (№ 21-71-10076).

1. URL: <https://public.wmo.int/ru/наблюдения> (дата обращения: 4.11.2021).
2. Кабанов М.В., Тихомиров А.А. Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: итоги деятельности КТИ «Оптика» СО РАН за 25 лет // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 382–402.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. 30 лет Институту оптического мониторинга СО РАН: основные этапы формирования и развития научного направления // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 1. С. 6–11.
4. Кабанов М.В., Крутиков В.А., Тихомиров А.А. 40 лет Институту мониторинга климатических и экологических систем СО РАН: целевые задачи научных исследований // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 111–116.
5. Кабанов М.В. Климато-экологический мониторинг Сибири (КЭМС): программа физических исследований по локальным, региональным и глобальным изменениям в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 2. С. 146–156.
6. Контюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 года). Информационный обзор. Новосибирск: СО РАН, 1992. 62 с.
7. URL: <http://imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899> (дата обращения: 20.04.2021).
8. Яковлев Г.А., Кобзев А.А., Смирнов С.В., Беляева И.В., Аршинов М.Ю., Яковлева В.С. Синхронный мониторинг γ , β -фона и атмосферных осадков в геофизических обсерваториях ИМКЭС СО РАН и БЭК ИОА СО РАН // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 32, № 3. С. 165–179. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179.
9. Pashkin A.D., Repina I.A., Stepanenko V.M., Bogomolov V.I., Smirnov S.V., Telminov A.E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 386. P. 012035.
10. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. ГЕОФИАН. 1954. № 24 (151). С. 163–187.
11. Степаненко В.М., Репина И.А., Барсков К.В., Артамонов А.Ю., Богомолов В.Ю., Варенцов М.И., Гавриков А.В., Пашкин А.Д. Исследование структуры атмосферной турбулентности над неоднородным ландшафтом // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сб. тр. М.: Физматкнига, 2018. С. 81–93.
12. Barskov K.V., Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Yu., Gavrikov A.A. Two regimes of turbulent

- fluxes above frozen small lake surrounded by forest // Bound.-Layer Meteorol. 2019. V. 173, N 3. P. 311–320.
13. *Zilitinkevich S.S., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Mironov D.V.* Third-order transport and nonlocal turbulence closures for convective boundary layers // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. P. 3463–3477.
 14. *Mironov D.V., Gryanik V.M., Lykossov V.N., Zilitinkevich S.S.* Comments on “a new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer” // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56, N 19. P. 3478–3481.
 15. *Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е.* Связь статистических характеристик турбулентности с когерентными структурами по результатам пульсационных измерений в городском каньоне // Процессы в гео-средах. 2021. Т. 27, № 1. С. 1020–1027.
 16. *Ваулин П.П., Кутелев А.Ф., Тихомиров А.А., Шапиро И.Я.* Комплексы аппаратуры для исследования параметров атмосферы // Тезисы докл. V Всесоюз. симпози. по лазерному и акустическому зондированию атмосф. Ч. IV. Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР. 1978. С. 8–15.
 17. *Тихомиров А.А.* ИМКЭС СО РАН // Создатели российских лазеров: монография / сост. Ю.В. Рубаненко, Е.В. Можелев. М.: Столичная энциклопедия, 2016. С. 259–266.
 18. *Азбукин А.А., Бурков В.В., Корольков В.А.* Малогабаритный оптический гигрометр многоцелевого назначения // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: Коллективная монография / под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. С. 196–202.
 19. *Азбукин А.А., Бурков В.В., Корольков В.А.* Автоматизированный метеокomплекс нового поколения // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: Коллективная монография / под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. С. 208–217.
 20. *Солдаткин Н.П.* Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: коллективная монография. Томск: Спектр, 1997. С. 217–232.
 21. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Солдаткин Н.П.* Корабельный измеритель метеорологической дальности видимости // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений: коллективная монография. Томск: Спектр, 1997. С. 243–253.
 22. *Тихомиров А.А.* Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
 23. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеор. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 24. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Шелевой В.Д.* Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2009. № 2. С. 101–106.
 25. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.
 26. *Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений:* Пат. 2319987. МПК G 01 W 1/02. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Шелевой В.Д.* Ин-т мониторинга кли-
 - матических и экологических систем; ООО “Сибаналитприбор”. № 2006119583; Заявл. 05.06.2002; Оpubл. 20.03.2008. Бюл. № 8.
 27. *Ультразвуковая метеостанция*, версия 3.0 (“Метео 3.0”): Свид. об офиц. рег. progr. для ЭВМ № 2002612038. *Богушевич А.Я.* № 2002610297. Заявл. 04.03.2002; Запер. 03.12.2002.
 28. *Корольков В.А., Тельминов А.Е., Тихомиров А.А.* Метрологическое обеспечение ультразвуковых термоанемометров для измерения пульсационных характеристик метеорологических величин // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 921–928. DOI: 10.15372/AOO20151009; *Korolkov V.A., Telminov A.E., Tikhomirov A.A.* Metrological support of ultrasonic thermo-anemometers for measurement of pulsation properties of meteorological parameters // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 96–103.
 29. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин // Вестн. акад. воен. наук. 2008. Т. 24, № 3. С. 144–148.
 30. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Аппаратно-программный комплекс для исследований структуры полей турбулентных флуктуаций температуры и ветра // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 378–384. DOI: 10.15372/AOO20180507; *Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Hardware-software complex for studying the structure of the fields of temperature and wind turbulent fluctuations // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 479–485. DOI: 10.1134/S1024856018050032.
 31. *Кураков С.А., Зуев В.А.* Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 994–999. DOI: 10.15372/AOO20161114.
 32. *Korolkov V.A., Telminov A.E., Komarov A.I., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A.* Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96805Z.
 33. *Богушевич А.Я., Корольков В.А., Кураков С.А., Тельминов А.Е., Тихомиров А.А.* Измерительные комплексы для определения вертикальных профилей метеорологических величин в атмосферном пограничном слое // Сб. научных статей по материалам III Всерос. науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» (25–27 ноября 2015 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС “ВВА”. 2016. С. 17–21.
 34. *Korolkov V.A., Pustovalov K.N., Tikhomirov A.A., Telvinov A.E., Antonovich V.V., Kobzev A.A.* Measurement of meteorological quantities in the atmospheric boundary layer of the ultrasonic weather station АМК-03 on tethered balloon // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 1083380.
 35. *Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А.* Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 990–996.
 36. *Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A.* Determination of the rate of fall of rain drops in measurements of their parameters by an optical rain gauge // Meas. Tech. 2017. V. 59, N 11. P. 1175–1180.
 37. *Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е.* Оптимизация процедуры калибровки оптико-электронного измерителя осадков // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 7. С. 535–538.

38. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Измерение количества осадков с помощью оптического осадкомера в течение летнего периода 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 2. С. 152–155.
39. Kalchikhin V., Kobzev A., Nagorskiy P., Oglezneva M., Pustovalov K., Smirnov S., Filatov D. Connected variations of meteorological and electrical quantities of surface atmosphere under the influence of heavy rain // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1. P. 1–11.
40. Yakovleva V., Zelinskiy A., Parovik R., Yakovlev G., Kobzev A. Model for reconstruction of γ -background during liquid atmospheric precipitation // Mathematics. 2021. V. 9, N 1636. P. 1–10.
41. Yakovleva V., Yakovlev G., Parovik R., Zelinskiy A., Kobzev A. Rainfall intensity and quantity estimation method based on gamma-dose rate monitoring // Sensors. 2021. V. 21, N 6411. P. 1–16.
42. Итополитов И.И., Кабанов М.В., Смирнов С.В. Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 7–14.
43. Тихомиров А.А., Азбукин А.А., Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н. Информационно-измерительная система для обнаружения опасных метеорологических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Горная книга, 2009. № ОВ18. С. 124–130.
44. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Коммутационный контроллер передачи метеорологических данных // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 166.
45. Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 52–59.
46. Тихомиров А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Кобзев А.А. Региональная информационно-измерительная система для мониторинга атмосферного приземного слоя и прогноза опасных метеорологических явлений // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 5. С. 412–419.
47. Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Correlation features for rows averaged values of meteorological parameters obtained from measurements in regional network of the automated ultrasonic weather stations // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. P. 92924O.
48. Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Некоторые результаты работы территориально-распределенной метеорологической системы на основе сети постов ультразвуковых АМС // Метеорол. и гидрол. 2015. № 10. С. 85–95.
49. Korolkov V.A., Telminov A.E., Komarov A.I., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96805Z.
50. Bogushevich A.Ya., Korolkov V.A., Telminov A.E., Tikhomirov A.A. Multilevel ultrasonic complexes for monitoring of meteorological and turbulent parameters in the ground atmosphere // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100356T.
51. Petrov D.V., Matrosov I.I., Tikhomirov A.A. Raman gas analyzer applicability to monitoring of gaseous air pollution // Proc. SPIE. 2015. V. 9880. P. 96803C.
52. Abramochkin A.I., Korolkov V.A., Mutnitsky N.G., Tatur V.V., Tikhomirov A.A. Portable mercury gas analyzer with a lamp filled with natural mercury isotope mixture // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96803D.
53. Bogushevich A.Ya. Methodology of monitoring the temperature and wind stratification in the atmospheric boundary layer based on multilevel ultrasonic measurements // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 96806F.
54. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 156058.
55. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo: first field test results // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 2020. V. 611. P. 012053.
56. Корольков В.А., Кобзев А.А., Тихомиров А.А. Новая модификация автономной метеостанции АрктикМетео // Климатические риски и космическая погода: мат. междунар. конф. памяти Н.К. Кононовой (14–17 июня 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. С. 334–342.

A.A. Tikhomirov, V.A. Korolkov, S.V. Smirnov, A.A. Azbukin, A.Ya. Bogushevich, V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, S.A. Kurakov, A.E. Telminov, V.Yu. Bogomolov, M.M. Kabanov, S.A. Kapustin, I.A. Repina, A.D. Pashkin, V.M. Stepanenko. **Meteorological observations and instrumentation at IMCES SB RAS.**

Organization and history of the development of meteorological observations at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IMCES) are described, from the 2nd category weather station of DTI SM "Optics" (1994) to the present observations carried out at the Geophysical Observatory (GO) of IMCES, which is a stationary environmental monitoring point. A retrospective of the development of meteorological instrumentation at IMCES is presented beginning from the creation of experimental samples of automated systems for operational measurement of optical and meteorological characteristics of the atmosphere (70–80s of the XX century) during testing of different laser systems to the development and creation of meteorological instruments, including automatic ultrasonic weather stations of different purpose and geographically distributed information and measuring systems based on them. A number of the weather stations are included in the State Register of Measuring Instruments.

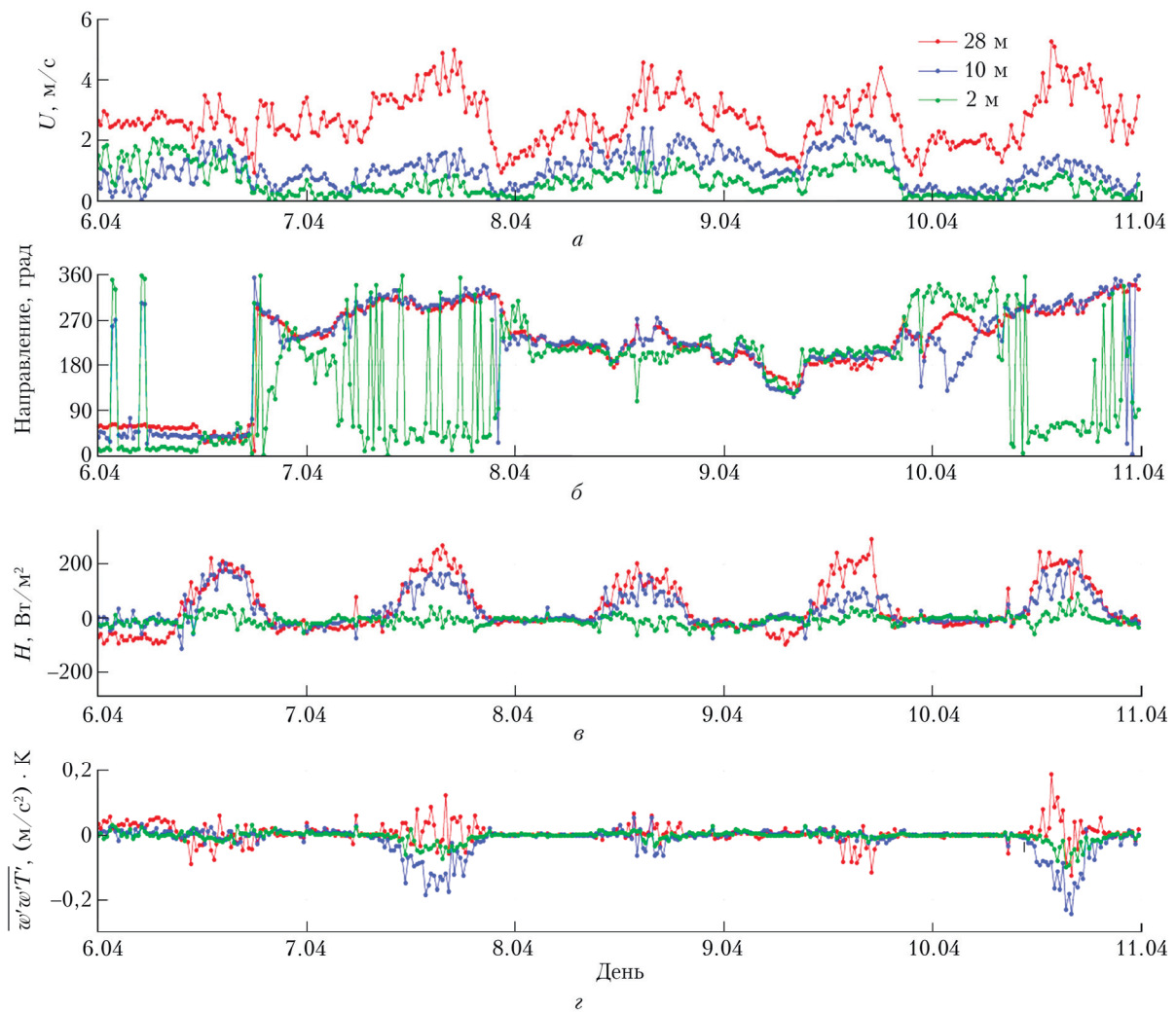


Рис. 1. Параметры натекающего потока и характеристики турбулентности с 20-минутным осреднением для периода с 6 по 10 апреля 2019 г.: a – скорость горизонтальной компоненты ветра U ; $б$ – направление ветра; $в$ – турбулентный поток явного тепла H ; z – третий момент $\overline{w'w'T'}$ (T' – пульсации термодинамической температуры, К)

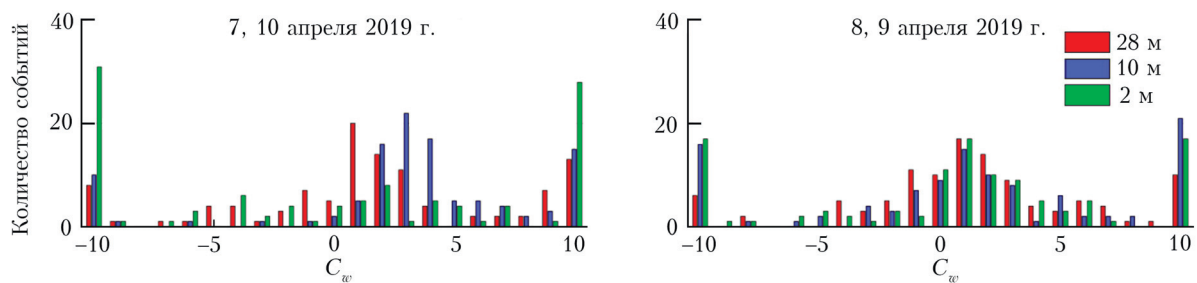


Рис. 2. Распределение коэффициента пропорциональности C_w для двух режимов (слева – режим 1, справа – режим 2). В крайних точках просуммированы значения, выходящие за границу шкалы