

На правах рукописи



Кураков Сергей Анатольевич

**АВТОНОМНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА
ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск-2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН)

Научный руководитель:

Зуев Владимир Владимирович

доктор физико-математических наук, чл.- корр. РАН, профессор

Официальные оппоненты:

Катаев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ

ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Сакерин Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории оптики аэрозоля ФГБУН Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Защита состоится 24.12.2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте:

<https://portal.tpu.ru/council/indcouncils/6064/worklist>

Автореферат разослан _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные темпы и масштабы изменения климата активно формируют новые условия существования природной среды. Для их контроля необходимо иметь развитую сеть станций климатического, метеорологического и экологического мониторинга, покрывающую значительные территории с необходимым пространственным разрешением, включая труднодоступные территории в горных, болотистых и арктических зонах.

Производимые в настоящее время автоматические системы контроля природной среды имеют высокую стоимость, поэтому построение на их основе развитой измерительной сети не оправдано экономически. В тоже время, современные технологии позволяют создавать весьма эффективные и недорогие технические средства. Таким образом, создание автономных комплексов, систем и датчиков контроля природной среды для труднодоступных территорий является весьма **актуальной задачей**.

Целью работы является создание на основе современных технологий автономного атмосферно-почвенного измерительного комплекса и автономных датчиков для контроля изменений ряда стандартных и дополнительных метеорологических величин, предназначенных для контроля природной среды на труднодоступных территориях.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих **задач**:

- 1) разработать способ контроля изменений профилей температуры в грунтах, почвах, снежных и ледовых покровах и реализовать данный метод в технических средствах;
- 2) разработать новые датчики для контроля потока солнечной радиации и уровня воды в природных водоемах;
- 3) разработать и создать беспилотный регистратор пространственных полей температуры, давления, влажности, а также усредненных значений скорости и направления ветра в пограничном слое атмосферы;
- 4) на основе предложенных методов и разработанных технических средств для контроля изменений профилей температуры в грунтах, почвах и ледовых покровах разработать и реализовать базовый автономный атмосферно-почвенный

измерительный комплекс (АПИК), предназначенный для оперативного контроля состояния природной среды на труднодоступных территориях, обеспечивающий передачу измерительной информации на удаленный сервер и позволяющий удаленный доступ к элементам оборудования и базам данных сторонним пользователям.

Методы исследования. Использовался комплексный подход, включающий в себя анализ научных и технических источников, охватывающих область исследования; анализ и параметризацию требований к новому оборудованию и цифровой обработке и передаче информации, метрологическую калибровку датчиков, разработку электронных блоков АПИК и программных алгоритмов, а также проведение натурных испытаний созданных технических средств.

Научная новизна

1. Предложены, научно обоснованы и реализованы новые технические решения по конструкции датчика высоты снежного покрова (патент РФ № 2542598) и регистратора таяния ледников (патент РФ № 2606346), основанные на определении температурного градиента на границе снега или льда и воздуха с помощью температурного зонда или термокосы, состоящей из жёстких сегментов, для автоматического складывания, соединённых между собой гибким кабелем и использующих множество температурных датчиков.

2. Предложена и обоснована новая конструкция зонда для контроля изменений вертикального профиля температуры среды, обеспечивающая уменьшение теплопередачи через соединительный кабель, передающий информацию на контроллер-регистратор, за счет присоединения кабеля к зонду на глубине 10-20 см и размещении его в закрытой траншее (патент РФ № 2658552).

3. Предложена новая конструкция устройства контроля изменений высоты снежного покрова в горах для оценки лавинной опасности, имеющего длинный пластиковый корпус, в котором установлена вертикальная цепочка датчиков температуры, контроллер, радиомодем, датчики положения, GPS-приемник и блок автономного питания, обеспечивающая сбор оперативной информации для контроля лавинной ситуации (патент РФ № 2617146).

4. Впервые предложены и обоснованы способы измерения усредненных

значений скорости и направления ветра, основанные на использовании аэродинамических характеристик БПЛА мультикоптерного типа и его навигационного оборудования при зависании в определенной точке пространства (патенты РФ №№ 2600519, 2616352, 2617020, 2650094).

5. Разработана концепция базового Атмосферно-измерительного комплекса АПИК для контроля изменений стандартных метеорологических величин: температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра. АПИК дополнен авторскими датчиками для контроля изменений дополнительных метеовеличин: высоты снежного покрова, солнечной радиации, профиля температуры грунта, уровня воды, а также датчиками: осадков, влажности грунта и проводимости почвы. Алгоритм работы контроллера-регистратора АПИК обеспечивает с заданным периодом опрос цифровых и аналоговых датчиков, сохранение полученных данных в энергонезависимой памяти (логгере) с привязкой ко времени измерения. Связь для конфигурирования работы и считывания данных на внешний сервер происходит через GSM-модем, Wi-Fi модуль, спутниковый интернет или через интерфейс USB.

Реализация результатов работы.

Предложенные автором технические решения позволили создать более 300 устройств, комплексов и систем контроля параметров природной среды, которые работают во многих регионах России, в том числе более 70 АПИК измеряют и передают информацию по каналам сотовой и спутниковой связи.

Настоящая работа выполнялась в рамках государственных заданий по программам и проектам:

- 1) ФЦП ИР, Проект «Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя» (Соглашение № 14.607.21.0030, идентификатор RFMEFI60714X0030) (2014-2016 гг.);
- 2) Проект СО РАН VIII.80.2.2 «Научные основы создания оптических, акустических и электронных приборов, комплексов и систем для метеорологических измерений и технологии их применения в задачах мониторинга окружающей среды» (2012-2016 гг.);
- 3) в пяти проектах Приборной программы СО РАН «Импортозамещение» (2012

- 2013 гг.) на поставку комплексов: «АПИК», «АПИК-002» – ИГ СО РАН (г. Иркутск); «АПИК-004» – ИПА СО РАН (г. Новосибирск); «АПИК-007» – ЦКП БНЦ СО РАН (г. Улан-Удэ); «АПИК-008» – ИМЗ СО РАН (г. Якутск);
- 4) Программа ФНИ СО РАН II.2П, № НИОКТР АААА-А16-116120810008-05;
- 5) Проект СО РАН IX.138.2.5 (2017-2020 гг.);
- 6) Проект задания Минобрнауки РФ № 5.3279.2017/4.6 5 (2017-2019 гг.);
- 7) ФЦП ИР, Проект «Разработка и создание автоматической метеорологической станции арктического исполнения для труднодоступных территорий и Северного морского коридора (АрктикМетео)» (Соглашение № 14.607.21.0205, уникальный идентификатор RFMEFI60718X0205)(2018-2020 гг.);
- 8) Проект РФФИ 18-05-00306 (2018-2020 гг.);
- 9) Проект РНФ 20-67-46018 «Климатически и антропогенно обусловленные изменения уязвимых экосистем Тувы» (2020-2022 гг.);
- 10) УНУ: Мегаустановка «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль широтного градиента» (<http://ckp-rf.ru/usu/586718/>).

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается применением контрольно-испытательного оборудования для калибровки созданных технических средств и сравнительными испытаниями, проведенными на территории Сибири и Дальнего Востока с использованием аттестованной аппаратуры.

Практическая значимость созданных измерительных комплексов состоит в значительном расширении сетей контроля погодных, климатических и экологических процессов природной среды на удалённых территориях, включая водные объекты, болота, мерзлотные грунты и горные системы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная измерительная рейка, представляющая собой протяжённую трёхпроводную печатную плату с установленными на ней малогабаритными цифровыми датчиками температуры, обеспечивает контроль высоты снежного покрова по температурному градиенту на границе снега и воздуха с разрешающей способностью, определяемой расстоянием между датчиками и габаритным

размером датчика (при использовании датчика DS18B20 разрешающая способность составляет 5 мм), а малое сечение рейки (11 мм) снижает паразитную теплопередачу и уменьшает влияние измерительной рейки на естественный снежный покров.

2. Автоматический регистратор таяния ледников, представляющий собой контроллер-регистратор и термокосу с малым сечением (1,1 см), устанавливаемую с упором в дно пробурённой в леднике скважины, позволяет с заданным временным периодом осуществлять контроль профиля температуры и по отличию от температуры вне скважины вычислять верхнюю границу ледника с разрешающей способностью, определяемой расстоянием между цифровыми датчиками температуры, которые установлены на жестких сегментах (длиной 40 см), соединённых между собой гибким кабелем, обеспечивающим, при таянии ледника, автоматическое складывание термокосы, а дополнительное наличие в контроллере солнечной батареи, радиомодема, GPS-приемника позволяет оперативно передавать информацию о профиле температуры и перемещении ледника.

3. Разработанный алгоритм определения средних значений горизонтальной составляющей скорости в интервале (0...20) м/с с погрешностью $\pm 0,5$ м/с и направления ветра в интервале (0...360) град. ± 15 град. обеспечивает их вычисление по перемещению беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа, движущегося под воздействием ветра, находящегося в режиме удержания высоты и вертикально направленного вектора тяги, снабженного системой спутниковой навигации, электронным гироскопом и электронным магнитным компасом. При этом полный усреднённый вектор скорости и направления ветра определяется путем измерения наклона вектора тяги БПЛА при его зависании в точке или при равномерном движении.

4. Созданная обширная сеть автономных атмосферно-почвенных измерительных комплексов АПИК, включающих измерительные датчики, автономные контроллеры-регистраторы, радиомодули передачи информации, сервер и базу данных и разработанное к ним программное обеспечение, позволяют осуществить долговременный комплексный мониторинг состояния природной среды в

удаленных и труднодоступных болотных, лесных, степных и горных ландшафтах без участия операторов-метеорологов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались более чем на 30 международных и всероссийских конференциях:

Междунар. симп. «Контроль и реабилитация окружающей среды» (Томск, 2004 г.); Междунар. конфер. «ENVIROMIS» (Томск, 2008, 2016, 2018 гг.); Междунар. НПК «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (Одесса, 2011 г.); Междунар. НПК «Реки Сибири и Дальнего Востока» (Иркутск, 2013 г.); Intern. Conf. «Paleolimnology of Northern Eurasia» (Petrozavodsk, 2014); Междунар. НПК «Земельные и водные ресурсы: мониторинг эколого-экономического состояния и модели управления» (Улан-Уде, 2015 г.); Междунар. НПК «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2016 г.); Всеросс. конфер. «Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу» (Томск, 2003, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.); Всеросс. науч. конфер. с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010 г.; Москва, 2015 г.); Всеросс. НПК «Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга: методологические аспекты повышения качества функционирования. Академические Жуковские чтения» (Воронеж, 2015 г.); Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2014, 2019 гг.); Всеросс. научн. конфер. с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2014 г.); Всеросс. НПК с международным участием «Современные достижения и проблемы в области изучения окружающей среды» (Барнаул, 2014 г.); Всеросс. научн. конфер. с международным участием «Почвы холодных областей: генезис, география, экология» (Улан-Удэ, 2015 г.); III Междунар. симп. «Физика, химия и механика снега» (Южно-Сахалинск, 2017); II Всеросс. НПК «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития» (Казань, 2018 г.); Междунар. географическая конфер. «Экономический коридор: Китай-Монголия-Россия» (Иркутск, 2018 г.); Всеросс. конфер. «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий» (Сочи, 2018); Междунар. научн.-техн. Конфер. «Системы контроля

окружающей среды – 2018» (Севастополь, 2018 г.); Всеросс. НПК «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (С.-Петербург, 2019 г.).

Личный вклад автора заключается в том, что он выполнил весь комплекс работ по проектированию, изготовлению и испытанию созданного электронного оборудования, включая постановку задач, разработку электронных схем, печатных плат, макетирование, изготовление и настройку датчиков и устройств. Руководил и непосредственно участвовал в разработке алгоритмов ПО и структур хранения данных.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 75 работах, включая: 1 глава в коллективной монографии, 10 статей в журналах из списка ВАК (1 без соавторов), 2 статьи, входящих в международную базу данных (Scopus), 10 патентов на изобретение (4 без соавторов) и 52 тезиса и материала докладов в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 118 наименований и 4-х приложений. Общий объем работы составляет 172 страниц машинописного текста, содержит 13 таблиц, 63 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, показаны научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора. Приведены результаты апробации работы и публикации ее теме, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены требования ВМО по контролю изменчивости стандартных и дополнительных метеорологических величин и приведен обзор технических средств для контроля основных метеорологических величин в приземной атмосфере и дополнительных метеовеличин в атмосфере, грунтах, ледовых и снежных покровах, а также в водной среде. Рассмотрено состояние работ по бортовым автоматическим метеостанциям (АМС) для контроля пространственного распределения полей метеовеличин в атмосферном пограничном слое

(АПС). Проведена оценка основных достоинств и недостатков рассмотренных технических средств. На основании проведенного анализа сформулирована основная цель диссертационной работы и решаемые в ней задачи.

Вторая глава посвящена описанию результатов разработки и реализации серии датчиков и зондов, предназначенных для контроля высоты снежного покрова, вертикального профиля температуры снега, температурных профилей грунтов, регистрации процесса таяния ледников и динамики температур, оперативного контроля изменений уровня воды, а также солнечной радиации.

Передача тепла от поверхности вглубь или в обратном направлении происходит чрезвычайно медленно. Эти обстоятельства являются основными в формировании особенностей временных вариаций вертикального профиля температуры при переходе из одной среды в другую. Определение точки перегиба в профиле температуры позволяет определить высоту снежного покрова с необходимой точностью. Создан датчик высоты снежного покрова, основанный на анализе вертикального профиля температуры. В его основу положена измерительная линейка в виде трехпроводной печатной платы с установленными на ней малогабаритными цифровыми датчиками температуры DS18B20 (рис. 1). Расстояние между ними определяет разрешающую способность устройства. Для датчиков DS18B20 оно составляет 5 мм при ширине печатной платы 9 мм.

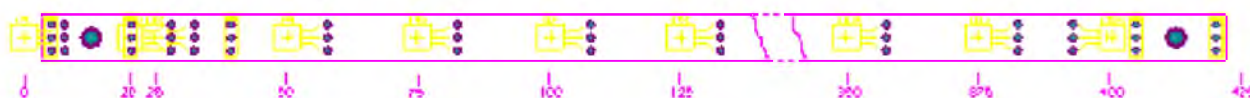


Рисунок 1 – Конструкция печатной платы измерительной линейки с размещенными на ней датчиками температуры DS18B20 при пространственном разрешении 25 мм

Поперечный размер измерительной линейки с наружной тепло- и электро-изоляцией не превышает 11 мм. Это снижает паразитную теплопередачу и уменьшает влияние рейки на естественный снежный покров. Каждый датчик DS18B20 имеет уникальный серийный идентификатор, поэтому на один 3-х жильный кабель можно подключить 100 и более датчиков. При необходимости выполнения контроля высоты снежного покрова более 400 мм соединяют последовательно несколько таких печатных плат.

На рисунке 2 приведена монтажная схема датчика высоты снежного покрова. Регистратор 5 с заданным периодом одновременно считывает показания всех цифровых термометров (поз. 1), сохраняет их в памяти, с последующей передачей в компьютер для вычисления высоты снежного покрова. Расстояние между термометрами (поз. 1) составляет 5 см. Высота снежного покрова определяется по превышению заданного порогового значения разницы показаний между двумя соседними, термометрами, начиная с верхнего.

Результаты натурных данных за сутки 01.02.2020 показаны на рис. 3.

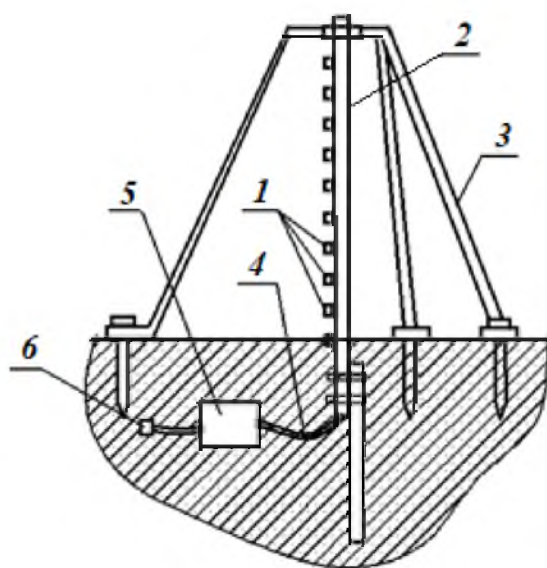


Рисунок 2 – Датчик высоты снежного покрова: 1 – цифровые термометры (датчики температуры); 2 – измерительная рейка; 3 – тренога; 4 – однопроводной интерфейс; 5 – регистратор; 6 – соединительный кабель USB

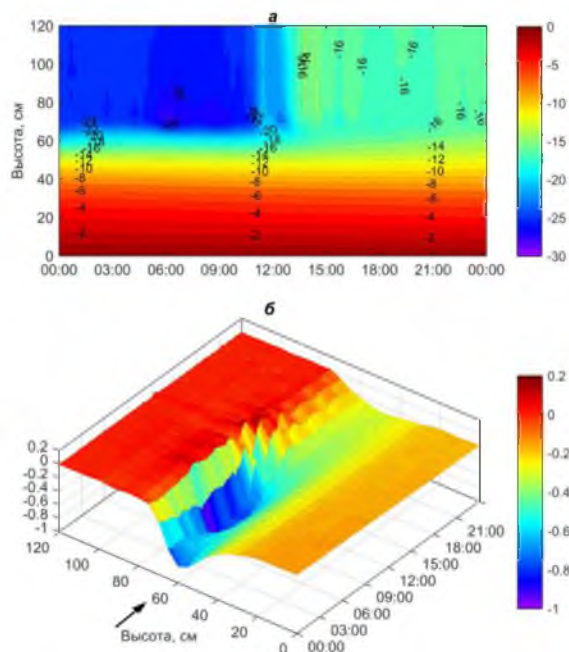
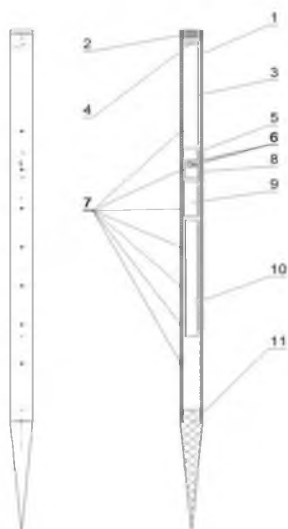


Рисунок 3 – Пример профиля температуры: а) поле температуры; б) поле производной температуры; стрелкой указана высота покрова



Основными данными для прогнозирования схода снежных лавин являются высота и вертикальный профиль температур снежного покрова. Разработана конструкция температурного зонда, в которой датчики температуры устанавливаются в жёсткий пластиковый корпус (рис. 4). Это

Рисунок 4 – Конструкция зонда: 1 – жесткий корпус; 2 – крышка; 3 – антенна; 4 – GPS-приемник; 5 – компас; 6 – датчики положения; 7 – датчики температуры; 8 – радиомодем; 9 – контроллер; 10 – аккумуляторы; 11 – острый наконечник

даёт возможность быстрой установки множества устройств, путем сброса с вертолета в труднодоступных местах и удаленного сбора показаний

для оперативного прогнозирования схода лавин. Кроме датчиков и контроллера в длинном жестком пластиковом корпусе располагаются: радиомодем, GSM-модем, антенна, датчики положения, GPS-приемник, аккумуляторы. Острый наконечник позволяет устанавливать зонд в снег с помощью вдавливания или вбивания. Большое количество датчиков, установленных сбрасыванием с вертолета либо при помощи лыжников, с GPS-координатами точек их установки, позволяет оперативно оценить степень лавинной опасности.

Для проведения в республике Алтай автоматического контроля скорости таяния ледников и температуры в толще ледника, был предложен регистратор, использующий способ определения положения верхней границы ледника путем отслеживания разности температур между находящимся над льдом температурным датчиком и датчиком, находящимся ниже уровня льда (рис. 5).

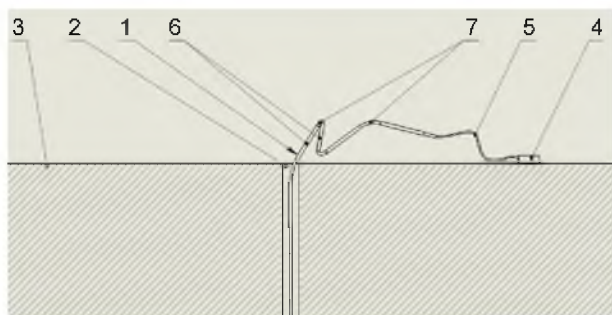


Рисунок 5 – Автоматический регистратор таяния ледников Куракова: 1 – термокосу; 2 – скважина; 3 – ледник; 4 – контроллер; 5 – соединительный кабель; 6 – жесткий сегмент; 7 – гибкое сочленение

Работает устройство следующим образом: термокосу устанавливают в верхний слой ледника (в вертикальную скважину), упирая нижний конец термокосу в дно скважины. Верхний конец термокосу подключают к контроллеру с помощью гибкого соединительного кабеля. Питание термокосу осуществляется от внутреннего источника питания контроллера. По мере таяния верхнего слоя ледника, глубина скважины уменьшается, верхние сегменты 6 лишаются опоры, сочленения 7 сгибаются под действием силы тяжести, и термокосу складывается на поверхности ледника, оберегая, таким образом, термокосу от чрезмерных

механических нагрузок. Датчики температуры в термокосе определяют температуру в различных ее точках. Контроллер периодически считывает эти данные и сохраняет во встроенной памяти. Данные либо автоматически передаются на удаленный сервер для анализа по беспроводному каналу связи, либо эпизодически (1-2 раза в год) считываются на переносной компьютер или SD карту.

На основе температурного датчика DS18B20 разработаны другие конструкции зондов для контроля температурных профилей в почве: одноподатчиковые и многоподатчиковые. Внешний вид многоподатчикового зонда длиной 1 м и сложенной термокосы показан на рис. 6. Предложен также способ установки температурных зондов в каменистых и мерзлотных грунтах.



Рисунок 6 – Многоподатчиковые температурные зонды: 1 – температурный зонд; 2 – соединительный кабель между зондом и контроллером; 3 – соединительные кабели между сегментами термокосы; 4 – контроллер-регистратор; 5 – сложенные сегменты термокосы

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения разработанных датчиков и зондов. В табл. 1 представлены результаты испытаний датчиков температуры DS18B20 и температурных зондов, созданных на их основе.

Таблица 1 – Сравнение требований ВМО к характеристикам приборов для выполнения контроля температуры почвы и характеристик калиброванных датчиков DS18B20

Измеряемая величина	Параметр	Требования ВМО	Калиброванный DS18B20
Температура грунта	Диапазон, °C	от минус 50 до +50	от минус 55 до +65
	Разрешение, К	0,1	0,0625
	Требуемая точность, °C	±0,1	±0,1

Разработан входящий в АПИК датчик уровня воды (рис. 7). Его характеристики приведены в табл. 2. Принцип действия датчика заключается в измерении

сопротивлений тензорезистивного моста, установленного на мембране, входящей в состав датчика уровня воды и расположенной в бронзовой гильзе 1. На мембрану с одной стороны оказывает давление столб воды - совместно с атмосферным давлением, а с другой стороны атмосферное давление через пустотелый кабель 4, сообщающийся с атмосферой через тройник 3 и трубку 5. Таким образом, изменения атмосферного давления не влияют на измерения уровня воды. Измеренные значения передаются в регистратор через токовый интерфейс (4...20 мА) через разъем 4. Калибровка датчика проводилась на специальном стенде.



Рисунок 7 – Датчик уровня воды: 1 – датчик; 2 – разъем; 3 – воздушный тройник; 4 – полый соединительный кабель; 5 – трубка

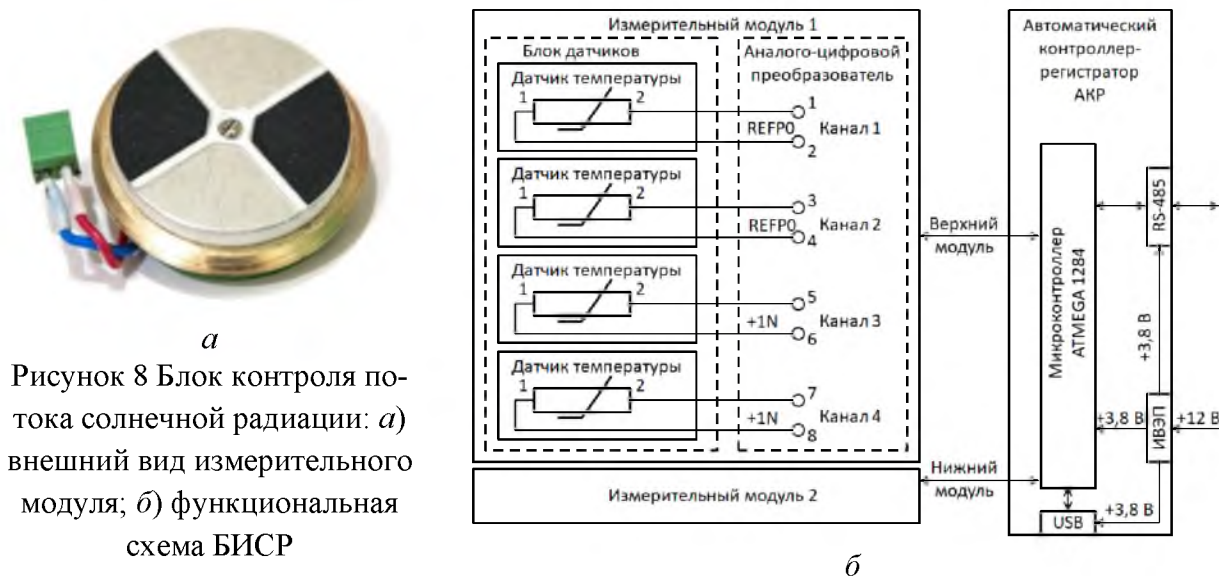
Таблица 2 – Основные характеристики датчика уровня воды

Характеристика	Значение
Максимальное измеряемое значение уровня воды, м	10,5
Точность измерения уровня воды, %	$\pm 0,5$
Диапазон измерения температуры воды, °С	$-5 \dots +60$
Точность измерения температуры воды, °С	$\pm 0,1$
Максимально допустимая длина кабеля, м	165
Габаритные размеры датчика без кабеля, мм: диаметр длина	31 90

Необходимость автоматического контроля радиационного баланса потребовала разработки блока контроля потока солнечной радиации (БИСР). Он имеет два измерительных модуля, ориентированных на 180° относительно друг друга, что позволяет отдельно измерять падающий и отражённый световые потоки. Измерительные модули имеют идентичные электрические схемы с четырьмя датчиками температуры (терморезисторами) каждый, и автоматический контроллер-регистратор (АКР). АКР преобразует информацию, поступающую с терморезисторов и пропорциональную падающей на них радиации, в информационные пакеты, которые передаются в систему сбора данных по каналу кабельной связи.

На рис. 8а показан внешний вид измерительного модуля, а на рис. 8б – функциональная схема БИСП.

Измерительный модуль имеет два зачернённых и два блестящих алюминиевых сектора. Поток солнечной радиации нагревает их и прикреплённые к ним с обратной стороны платиновые резисторы, по разнице сопротивлений которых рассчитывается плотность потока солнечной радиации.



Были проведены сравнительные лабораторные и натурные испытания БИСП с пиранометром CM11 которые показали хорошее совпадение результатов (коэффициент корреляции 0,998).

В третьей главе рассмотрены принципы построения на базе БПЛА портативной электронной метеостанции, способной регистрировать пространственное распределение полей: температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра на различных высотах в атмосферном пограничном слое. Контроль изменений первых трёх величин реализован с помощью портативной электронной метеостанции (ПЭМС), а параметры ветра – при использовании аэродинамических свойств БПЛА и его навигационного оборудования.

При использовании БПЛА коптерного типа, снабженного системой спутниковой навигации, один из способов определения усредненных значений скорости и направления ветра заключается в том, что аппарат запускают в заранее выбранную точку и на нужную высоту и переводят в режим удержания высоты и горизонтального положения. Затем запускают режим равномерного вращения

вокруг вертикальной оси, и измеряют с помощью системы спутниковой навигации широту, долготу и текущее время. Через время, кратное полному обороту аппарата вокруг вертикальной оси, измеряют координаты и время второй точки и, решая обратную геодезическую задачу, определяют направление и скорость ветра.

Другой способ определения усредненного вектора скорости ветра основан на вычислении наклона вектора тяги БПЛА при его строго вертикальном движении в атмосфере (рис. 9). Проведенные эксперименты показали, что раз-

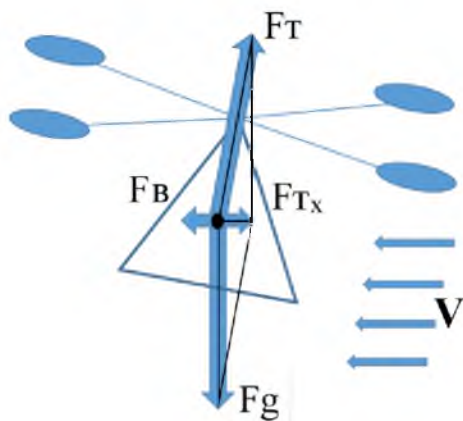


Рисунок 9 – Способ определения усредненного вектора скорости ветра

работанные алгоритмы определения средних значений горизонтальной составляющей скорости в интервале (0...20) м/с с погрешностью $\pm 0,5$ м/с и направления ветра в интервале (0...360) град. ± 15 град. обеспечивает их вычисление по перемещению БПЛА мультироторного типа, движущегося под воздействием ветра, находящегося в режиме удержания высоты и вертикально направленного вектора тяги. При этом полный усреднённый вектор скорости и

направления ветра определяется путем измерения наклона вектора тяги БПЛА при его зависании в точке или при равномерном движении. Предложены еще два способа определения скорости и направления ветра.

На рис. 10 показан внешний вид разработанной ПЭМС-БПЛА на гексакоптере DJI S900. ПЭМС располагается на высоте 40 см над плоскостью пропеллеров. Измерительная информация в on-line режиме передается по радиоканалу.

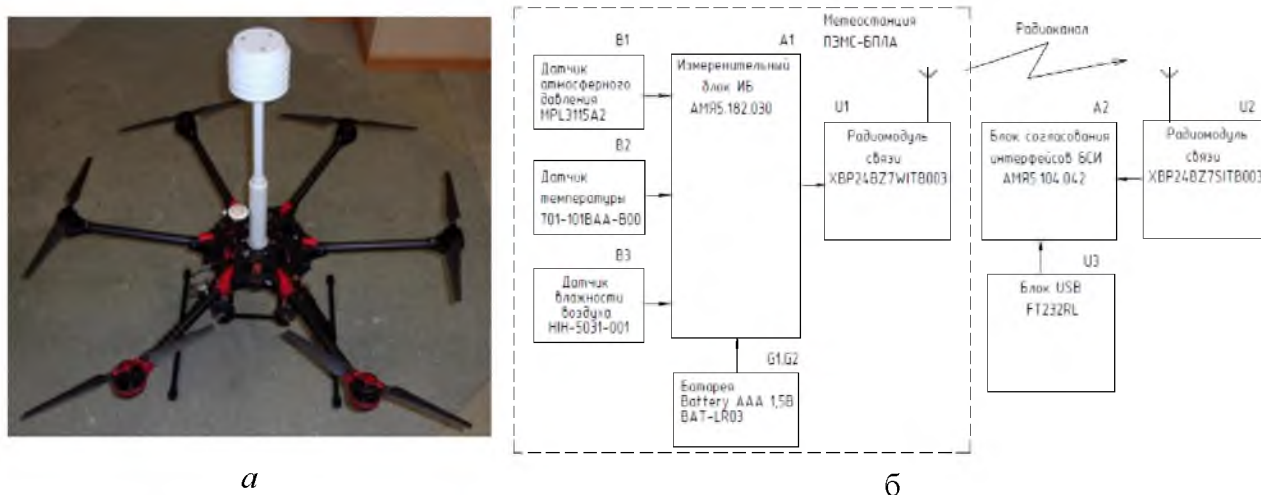


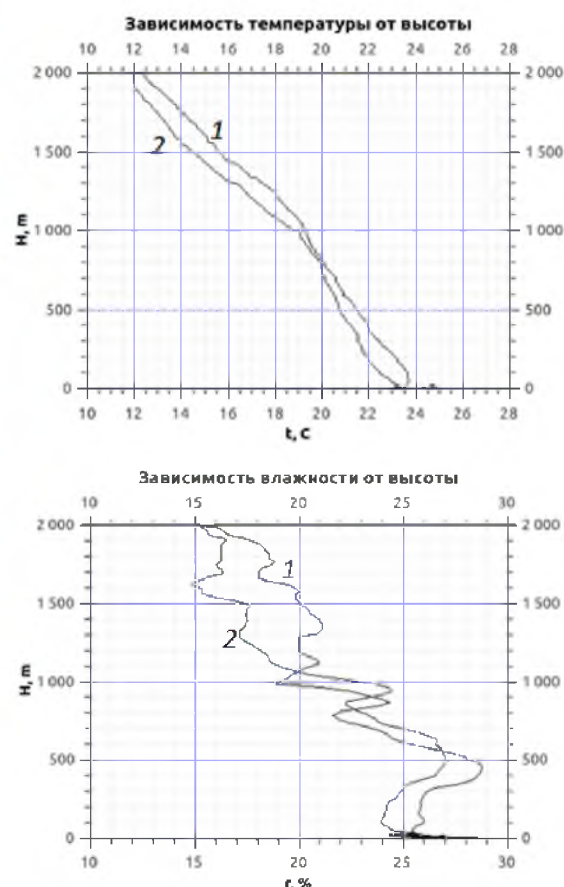
Рисунок 10 – ПЭМС-БПЛА: а) внешний вид; б) функциональная схема

Результаты натурных испытаний ПЭМС-БПЛА показаны на рис. 11. Траектория 2 отображает горизонтальную трассу полета БПЛА на высоте 40 м для измерений скорости и направления ветра. Испытания показали, что направление ветра на этой высоте составляло 248° при скорости $\sim 9,9$ м/с. Зависимости 1 на рис. 11б зарегистрированы при подъеме БПЛА, 2 – при его спуске. Погода имела неустойчивый характер, перистые облака, в конце эксперимента - сплошная облачность.



а

Рисунок 11 – результаты натурных испытаний ПЭМС-БПЛА: а) траектории полета; б)



измеренные вертикальные профили температуры и относительной влажности 02.09.2015

б

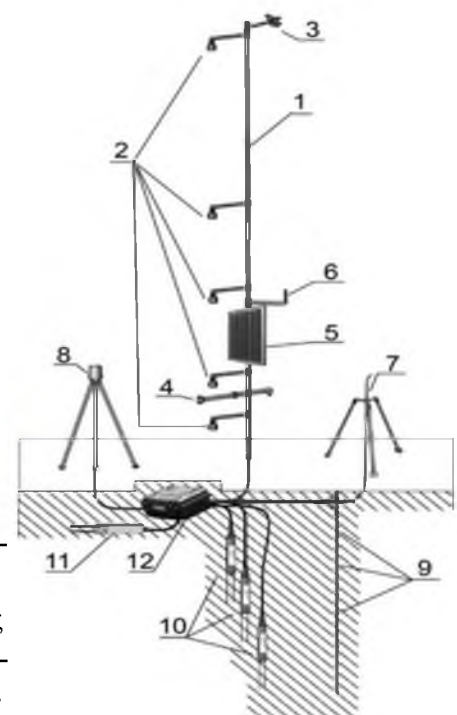
В четвертой главе сформулированы требования к аппаратным средствам для автономного мониторинга объектов природной среды на труднодоступных территориях. Представлены созданные модификации атмосферно-почвенного измерительного комплекса АПИК и результаты их применения. Обобщенная схема АПИК и одна из реализованных конфигураций представлена на рис. 12.

В кейсе 12 размещены автономный контроллер-логгер (АКЛ), аккумулятор, GSM-модем и датчик атмосферного давления. Микроконтроллер АКЛ через цифровой интерфейс опрашивает датчики и через GSM-модем передает данные на сервер. С помощью созданного ПО, АПИК в соответствии с установленными настройками производит регистрацию и передачу данных на сервер. ПО предоставляет возможность визуального представления рядов данных. Данные экспортируются в текстовый формат *.csv. Серверное ПО одновременно может работать с несколькими АПИК. Считывание и визуализация данных на персональных компьютерах (ПК) и конфигурирование АПИК возможно, как через СУБД, так и напрямую с АПИК, используя установленное на ПК клиентское ПО, выполненное в среде Borland C++ Builder 6.



а

Рисунок 12 – Схема АПИК (а) и конфигурация его модификации (б): 1 – мачта; 2 – совмещенные датчики температуры и влажности воздуха; 3 – датчик скорости и направления ветра; 4 – датчик солнечной радиации; 5 – солнечная батарея; 6 – антенна модема; 7 – датчик высоты снежного покрова; 8 – датчик количества и интенсивности жидких осадков; 9 – зонд для



измерения профиля температуры грунта; 10, 11 – датчики влажности и проводимости грунта; 12 – кейс с регистрирующей аппаратурой и автономным электропитанием

б

В настоящее время более 200 модификаций АПИК работают на обширной территории России.

В заключении представлены основные результаты работы.

1. Проведен обзор существующих датчиков для контроля изменений стандартных и дополнительных метеорологических величин и АМС, использующих эти датчики, отмечены их недостатки, осложняющие работу АМС на труднодоступных территориях и сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

2. Предложен датчик для контроля высоты снежного покрова, основанный на анализе вертикального профиля температуры в воздухе и снежном покрове. Созданный датчик в количестве более 50 шт. установлен на ряде наблюдательных постов и метеостанций в качестве средства контроля.

3. Разработана и изготовлена конструкция одноразового датчика контроля высоты снежного покрова, применяемого для оценки лавинной опасности. Предложена методика использования такого датчика для оценки снегозапаса и степени лавинной опасности на горных склонах.

4. Разработана и обоснована конструкция автоматического регистратора таяния ледников Куракова на основе термокосы, в которой датчики температуры расположены на равном расстоянии друг от друга и которые последовательно соединены между собой гибким кабелем. Конструкция дает возможность определения положения верхней границы ледяного покрова, обеспечивает установку термокосы вертикально с упором в дно скважины, снижение механических нагрузок на измерительный элемент (термокосу) за счет ее автоматического складывания.

5. Создан комплект термозондов различного конструктивного исполнения, предназначенных для непрерывного контроля вертикального профиля температуры в почве и грунтах до глубины 500 см с различным пространственным разрешением (минимальное разрешение 5 мм). Обосновано техническое решение по

выводу информации из термозонда и передаче ее в контроллер для уменьшения теплопередачи по соединительному кабелю.

6. Разработан и изготовлен датчик уровня воды, который обеспечивает оперативный контроль изменений уровня в широком диапазоне высот, характерном для развития паводков и половодий.

7. Разработан и изготовлен экспериментальный образец блока контроля потока приходящей и отраженной солнечной радиации, который имеет два измерительных модуля, ориентированных на 180° относительно друг друга. Измерительный модуль имеет два зачернённых и два блестящих алюминиевых сектора, температура которых измеряется четырьмя терморезисторами.

8. Теоретически и экспериментально показана возможность определения усредненных значений скорости и направления ветра на заданной высоте путем отслеживания траектории БПЛА коптерного типа под действием ветра с использованием аэродинамических свойств БПЛА и навигационного оборудования, входящего в его состав. Теоретически обоснован способ определения усредненного вектора скорости ветра по наклону вектора тяги БПЛА.

9. Разработан и изготовлен экспериментальный образец портативной электронной метеостанции ПЭМС-БПЛА, измеряющей вертикальные профили температуры, давления и относительной влажности атмосферного воздуха, размещаемой на мультикоптере с передачей измерительной информации по радиоканалу в on-line режиме. Проведены испытания экспериментального образца в климатической камере, которые показали, что он обеспечивает измерение: температуры воздуха в диапазоне от минус 50 до $+55^\circ\text{C}$, с погрешностью $\pm 0,3^\circ\text{C}$; атмосферного давления в диапазоне от 500 до 1000 гПа, с погрешностью $\pm 0,5$ гПа; относительной влажности воздуха в диапазоне от 5 до 100 %, с погрешностью 2,5 %. Проведены натурные испытания экспериментального образца ПЭМС-БПЛА по измерению вертикальных профилей этих метеорологических величин до высоты 2 км.

10. Разработана концепция и структурная схема базового атмосферно-измерительного комплекса АПИК, включающего датчики для контроля изменения

стандартных метеорологических величин: температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра. При этом использована оригинальная конструкция совмещенного датчика температуры и влажности воздуха. АПИК дополнен авторскими датчиками для контроля изменения дополнительных величин: высоты снежного покрова, солнечной радиации, профиля температуры грунта, уровня воды, а также покупными датчиками: количества и интенсивности осадков, влажности грунта и проводимости почвы.

11. Разработанный алгоритм работы контроллера-регистратора АПИК обеспечивает с заданным периодом опрос цифровых и аналоговых измерительных датчиков, сохранение полученных данных в энергонезависимой памяти (логгере) с привязкой ко времени измерения с помощью встроенного таймера. Связь для конфигурирования работы и считывания данных на внешний сервер происходит через GSM-модем, Wi-Fi модуль, спутниковый интернет или напрямую через интерфейс USB. Для экономии энергии контроллер почти всё время находится в спящем режиме. Для последующего использования метеорологической информации, занесенной в базу данных сервера, разработано клиентское приложение с соответствующим протоколом обмена данных.

12. Представлены результаты применения АПИК для климатических исследований в районах Большого Васюганского болота, Красиловского озера Алтайского края. Всего было разработано и изготовлено более 30 АПИК различных конфигураций, которые эксплуатировались в различных климатических зонах России от Белгородской до Магаданской областей и от Гыданского полуострова на севере, до Алтайских гор на юге.

В **приложении** приведены копии патентов, справки о внедрении результатов работы, акты испытаний, описание работы с программным обеспечением.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья в коллективной монографии

1. Кураков С.А. Автономная информационно-измерительная система мониторинга биоклиматических характеристик состояния окружающей среды / В.И. Галкин, В.А. Крутиков, С.А. Кураков, В.Г. Ушаков. // Кузбасс-3. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). Mining Informational and analytical bulletin (sci. and tech. journal). – М: Изд-во «Горная книга». – 2009. – Т. ОВ-18. – С. 150-151.

Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК

1. Кураков С.А. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ / С.А. Кураков, В.А. Крутиков, В.Г. Ушаков. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 5. – С. 166-167.
 2. Кураков С.А. Оценка элементов водного баланса и их динамика на заболоченных водосборах васюганского болота / Л.И. Дубровская, Д.В. Дроздова, С.А. Кураков. // Вестник ТГПУ. – 2011. – Выпуск № 5 (107). – С. 112-116.
 3. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды / С. А. Кураков. // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 29-32.
 4. Кураков С.А. Измерительный комплекс для регистрации параметров окружающей среды на водном объекте / В.В. Зуев, И.А. Суторихин, А.П. Шелехов, С.А. Кураков, У.И. Залаева. // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 188-190.
 5. Кураков С.А. Измерительный комплекс для автоматического долговременного контроля атмосферных и почвенных климатических параметров / А.В. Базаров, Н.Б. Бадмаев, С.А. Кураков, Б.-М.Н. Гончиков, Ю.Б. Цыбенков, А.И. Куликов. // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 4. – С. 158-159.
 6. Кураков С.А. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы / С.А. Кураков, В.В. Зуев // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29. – № 11. – С. 994-999.
 7. Кураков С.А. Динамика весеннего подъема уровня бессточных озер (на примере озера Красиловское Алтайского края) / В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, С.А. Кураков, И.А. Суторихин, Н.Ф. Харламова. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 4 – С. 76–80.
 8. Кураков С.А. Комплексный мониторинг погодно-климатического и гидрологического режима бассейна р. Майма (Горный Алтай): первые результаты / В.В. Зуев, С.А. Кураков, В.А. Уйманова. // Ползуновский вестник. – 2017. – № 3. – С. 70-75.
 9. Кураков С.А. Мобильный измерительный комплекс для сопряженного контроля атмосферных и почвенных параметров / А.В. Базаров, Н.Б. Бадмаев, С.А. Кураков, Б.-М.Н. Гончиков, Ю.У. Цыбенков, А.И. Куликов // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 4. – С. 104-109.
- A.V. Bazarov, N.B. Badmaev, S.A. Kurakov, B.-M.-N. Gonchikov, Y.U. Tsybenov, A.I. Kulikov. Mobile measurement system for the coupled monitoring of atmospheric and soil parameters // Russian Meteorology and Hydrology. – 2018. – V. 43. – No 4. P. 271-275. (Scopus).

10. Кураков С.А. Сравнительный анализ гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и Автономного комплекса «Майма» в бассейне реки Майма (Горный Алтай) / В.В. Зуев, Е.М. Короткова, В.А. Уйманова, С.А. Кураков // Водное хозяйство России. - 2018. - № 5. - С. 65-74.

Статьи в Международной базе данных (Scopus)

1. Kurakov S.A. Automatic meteorological measuring system for microclimate monitoring / M.V. Kiselev, N.N. Voropay, E.A. Dyukarev, S.A. Kurakov, P.S. Kurakova, E.A. Makeev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. First International Geographical Conference of North Asian Countries “China-Mongolia-Russia Economic Corridor: Geographical and Environmental Factor and Territorial Development Opportunities” 20-26 August 2018, Irkutsk, Russia. – 2018. V. 190. 012031. doi: 10.1088/1755-1315/190/1/012031.

2. Kurakov S.A. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog / E.A. Dyukarev, E.A. Godovikov, D.V. Karpov, E.D. Lapshina, I.V. Filippov, N.V. Filippova, E.A. Zarov, S.A. Kurakov // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – V. 12. – N2. P. 227-244.

Патенты

1. Патент № 80577 Российская Федерация, МПК (2006.01) G01D1/02, G01H11/08. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов / А.А. Беспалько, Н.Н. Хорсов, П.И. Федотов, С.А. Кураков; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет. - № 2008134233/22; заявл. 20.08.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

2. Патент № 2542598 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Датчик высоты снежного покрова / С.А. Кураков; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2013136310/28; заявл. 01.08.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

3. Патент № 2600519 Российская Федерация, МПК G01W 1/00. Способ определения усредненных значений скорости и направления ветра / С.А. Кураков; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2015136211/28; заявл. 26.08.2015; опубл. 20.10.2016, Бюл. № 29.

4. Патент №. 2606346 Российская Федерация, МПК E21B 47/07, G01K 13/00, G01W 1/00. Автоматический регистратор таяния ледников Куракова / С.А. Кураков, П.С. Куракова, О.А. Куракова; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2015154925; заявл. 21.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

5. Патент № 2613907 Российская Федерация, МПК G01N 33/24. Способ осуществления мониторинга за параметрами почвы / С.А. Кураков; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2016139182/15(060089); заявл.

14.09.2015; опубл. 21.03.2017, Бюл. № 9.

6. Патент № 2616352 Российская Федерация, МПК G01W 1/08. Способ определения усредненных значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и его направления / С.А. Кураков, П.С. Куракова, О.А. Куракова; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2016107560; заявл. 01.03.2016; опубл. 14.04.2017, Бюл. № 11.

7. Патент № 2617020 Российская Федерация, МПК G01W 1/08. Способ определения усредненного вектора скорости ветра / С. А. Кураков, П. С. Куракова, О. А. Куракова; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2016117531; заявл. 04.05.2016; опубл. 19.04.2017, Бюл. № 11.

8. Патент № 2617146 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Датчик уровня высоты снежного покрова для оценки лавинной опасности / С.А. Кураков; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2015144845; заявл. 19.10.2015; опубл. 21.04.2017, Бюл. № 12.

9. Патент № 2650094 Российская Федерация, МПК (2006.01) G01P 5/00, G01W 1/08. Способ определения усредненных значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и его направления / С.А. Кураков, П.С. Куракова, О.А. Куракова; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2016119943; заявл. 23.05.2016; опубл. 06.04.2018, Бюл. № 10.

10. Патент № 2658552 Российская Федерация, МПК (2006.01) G01K 3/00, G01K 13/00, E21B 47/07. Устройство для измерения вертикального профиля температуры среды / С.А. Кураков, П.С. Куракова, Е.А. Макеев, А.В. Дьячков, К.Л. Жуйков, Е.В. Сидоркина; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. - № 2017128070; заявл. 06.06.2017; опубл. 21.06.2018, Бюл. № 18.

В других научных изданиях – более 50 тезисов и докладов за 2007- 2019 гг.