

Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы

Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н.,
Кудринская Т.В., Петров Н.А.

Введение

Регулярные измерения атмосферно-электрических характеристик являются основой как экспериментального, так и теоретического изучения процессов в электродном слое атмосферы. Наблюдения на атмосферно-электрических станциях обычно включают в себя измерения основных элементов атмосферного электричества: градиента потенциала (напряженности) электрического поля V' , удельных полярных проводимостей воздуха (λ_+ и λ_-) и плотности полного вертикального электрического тока из атмосферы на землю j_o . При одновременном измерении всех этих параметров появляется возможность судить о процессах локального или глобального характера на данном участке атмосферно-электрической цепи.

При специализированных наблюдениях кроме названных основных элементов могут измеряться интенсивность ионообразования, концентрации полярных легких ионов, плотность объемных зарядов, составляющие вертикального электрического тока и т.д. В приземном слое атмосферы электрические характеристики тесно связаны с метеорологическими факторами, которые в свою очередь определяются географическим расположением пункта наблюдений, орографией местности и свойствами подстилающей поверхности. Поэтому для выяснения причин изменений электрического состояния приземного слоя необходимо отслеживать вариации метеорологических характеристик, определяющих термодинамический режим атмосферы.

Результаты комплексных измерений атмосферно-электрических и метеорологических характеристик позволяют выявить механизмы протекания электрических процессов в атмосфере, что дает возможность более точно интерпретировать данные регулярных наблюдений.

Экспериментальной базой атмосферно-электрических исследований кафедры общей и экспериментальной физики педагогического института Южного федерального университета (ПИ ЮФУ) служат данные полевых наблюдений, проводимых на протяжении нескольких десятилетий в условиях летних экспедиций. Исследования геофизической лаборатории тесно связаны с фундаментальными проблемами физики атмосферы, такими как, изучение особенностей структуры электродного слоя в различных физико-географических условиях, построение теоретических моделей глобальной атмосферно-электрической цепи.

Существенной чертой многолетних измерений является то, что все они выполнены посредством измерительного комплекса, где наряду с традиционными методами атмосферно-электрических наблюдений используется синхронная цифровая регистрация данных. Постоянство базовой части комплекса делает результаты измерений более надёжными с точки зрения сопоставимости данных, полученных в разные периоды и в разных пунктах наблюдений.

Пункты в соответствии с физико-географическими условиями можно систематизировать - с описанием особенностей площадок наблюдений - следующим образом:

ДЗНИИСХ. Опытные поля Донского зонального научно-исследовательского института сельского хозяйства - обширные сельскохозяйственные поля в 30 км северо-восточнее г.Ростова-на-Дону.

г.Ростов-на-Дону. Город с населением более миллиона человек, крупный индустриальный центр, расположен на правом берегу р.Дон вблизи устья. Степная зона, равнинный ландшафт. Площадка располагалась на агробиостанции пединститута на северо-восточной окраине города.

Берег озера Байкал. Сопки, тайга Восточной Сибири. *п.Б.Коты* – маленький таежный поселок, где расположена научная и учебная база Иркутского госуниверситета, в 18 километрах к северо-востоку от пос. Лиственничное, расположенного в устье р.Ангара. Площадка находится в 100-150 метрах от береговой линии на север от Байкала. С юга на север тянется долина,

окруженная сопками. Ширина долины порядка километра, высота сопки 70-100 метров. И долина, и сопки покрыты преимущественно хвойным лесом. Слой почвы на площадке очень тонок, под ним расположен галечник вперемешку с осадочными породами и водой. Грунтовые воды из-за близости акватории близки к поверхности: присутствуют на глубине не более 0,5 м. Непосредственно на метеоплощадке высеяна трава, высота ее 10-15 см.

Кашарский район. Район степной, сельский, всхолмленная равнина, балки, овраги. Расположен на севере области в 260 км северо-восточнее г.Ростова-на-Дону, на краю литосферной плиты Русской равнины. Кашарский район, будучи удаленным от зоны интенсивной промышленной деятельности, входит в число наиболее экологически чистых территорий области.

Орловский район. Район сельский, полупустынная зона, равнина. Расположен на юго-востоке области в Сальских степях, удален от индустриальных центров и связанных с ними источников загрязнений.

На измерительных площадках пунктов Ростовской области растительность под датчиками была срезана на уровне земли на площади не менее $20 \times 20 \text{ м}^2$. Задернение почвы при этом сохранялось, чтобы поверхность не пылила.

В основе создания и развития измерительного комплекса для наблюдений за атмосферным электричеством лежат следующие принципы:

1. Ориентация исследований на определенные цели: изучение электрического режима атмосферы, процессов формирования электродинамической структуры приземного слоя, определение индексов загрязнения атмосферы и т.п.;
2. Комплексность наблюдений: одновременное наблюдение за многими атмосферно-электрическими и метеорологическими характеристиками;
3. Автоматизация измерений, обработки и хранения экспериментальных данных.

Современный измерительный комплекс включает:

– одновременные градиентные измерения атмосферно-электрических характеристик (удельной электрической проводимости атмосферы,

электрического потенциала), концентрации радона-222 и метеорологических параметров (температуры воздуха и почвы, скорости ветра, влажности воздуха);

– измерение плотности полного тока и тока механического переноса из атмосферы на землю;

– одновременную непрерывную регистрацию напряженности атмосферного электрического поля, полярных электрических проводимостей, концентраций полярных легких ионов, метеорологических характеристик.

Схема расположения датчиков на измерительной площадке приведена на рисунке 1.

Измерительный комплекс

Измерение полярных удельных электропроводностей

Для измерения полярных удельных электрических проводимостей воздуха обычно используется метод аспирационного конденсатора. Прибор Гердиена для измерения электропроводности относится к тем, в которых используется аспирационный конденсатор с заземленной внешней обкладкой. По оси наружного цилиндра расположен внутренний цилиндрический электрод, который закрепляется на входном изоляторе электрометра или электростатического вольтметра. Аспирационный цилиндрический конденсатор, используемый в эксперименте, имеет следующие параметры: длина внутреннего электрода – 200 мм, его радиус – 3,5 мм, радиус наружного электрода – 36 мм. Режим работы конденсатора рассчитан исходя из критической подвижности ионов $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Скорость аспирации воздуха в конденсаторе контролируется и регулируется таким образом, чтобы заметно превышать критическое значение [1]. Создаваемое между обкладками цилиндрического конденсатора электрическое поле отклоняет ионы к внутреннему электроду; попадая на поверхность электрода, ионы отдают свой заряд, изменяя потенциал электрода от начального значения φ_0 до потенциала φ_t по окончании времени аспирации.

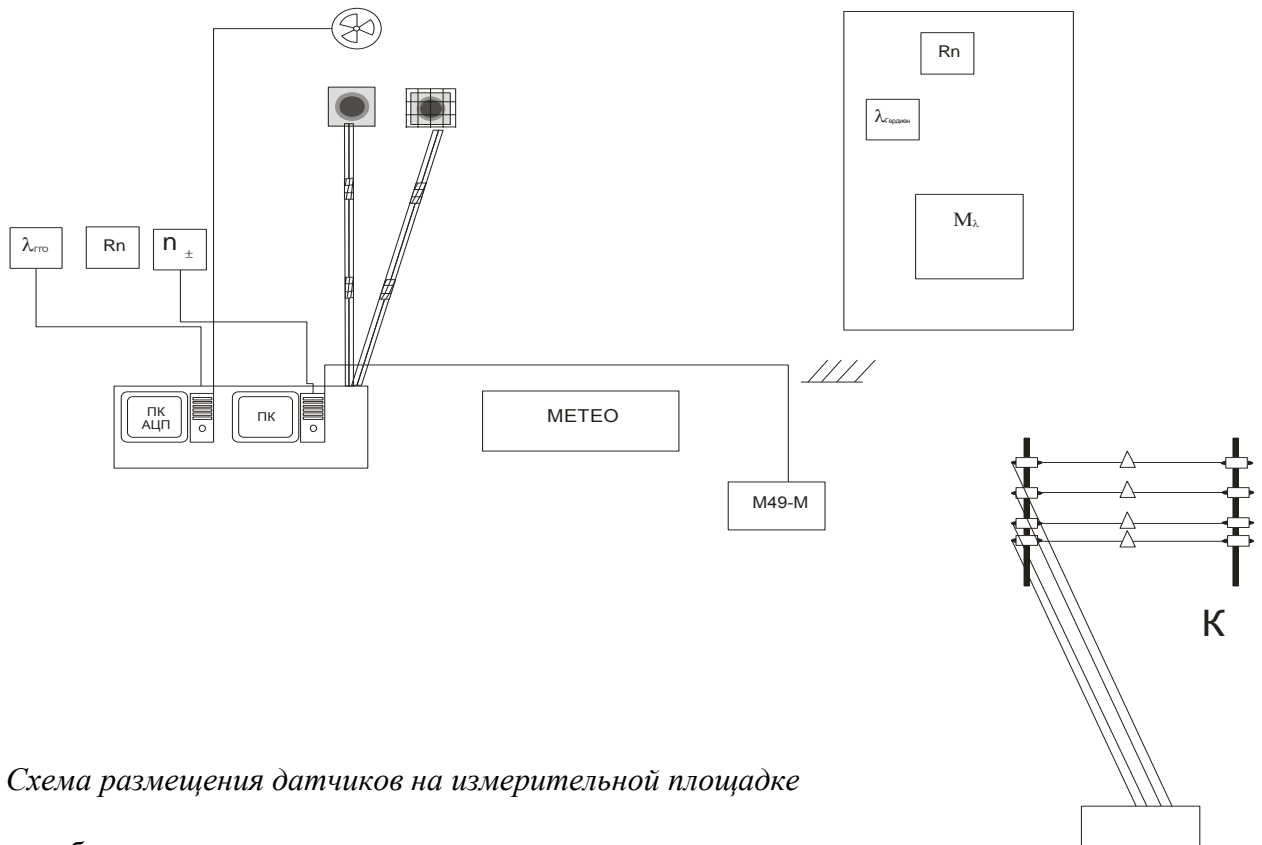


Рис. 1. Схема размещения датчиков на измерительной площадке

Условные обозначения:

прибор для измерения объемной активности радона-222
радонометр «AlphaGUARD»


прибор для измерения полярных концентраций легких ионов
счетчик ионов «Сапфир-3К»

прибор Гердиена системы ГГО для измерения полярных удельных
электропроводностей «Электропроводность 2»

площадка для измерения метеоэлементов (психрометры Ассмана на
высоте 0.15м, 0.5м, 1м, 2м; чашечные анемометры на высоте 0.5м, 1м,
2м; крыльчатые анемометры на высоте 0.5м, 1м)

цифровая метеостанция М49-М


 почвенные термометры Савинова на глубине 0.05м, 0.10м, 0.15м, 0.20м

 электростатический флюксометр системы ГГО «Поле-2»

 пластина для измерения плотности полного тока

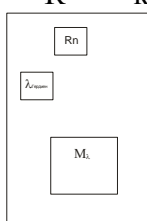
 пластина для измерения плотности тока механического переноса

 экранированный соединительный провод

 радиоактивный коллектор

 эбонитовый изолятор

К коллекторная установка

 площадка для измерения вертикальных профилей полярных удельных
электропроводностей прибором Гердиена системы Литвинова и
объемной концентрации радона-222 радонометром «AlphaGUARD» на
высоте 0.05м, 0.3м, 0.6м, 1м, 2м, 3м

По данным измерений потенциала удельная электрическая проводимость определяется расчетным путем согласно выражению: $\lambda = \frac{\varepsilon_0 (C + C')}{t C} \ln \frac{\varphi_0}{\varphi_t}$, где C и C' - емкости аспирационного конденсатора и измерительного прибора соответственно, t - время аспирации, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

При измерении вертикальных профилей полярных удельных электропроводностей прибор последовательно помещается на уровнях 0,05; 0,3; 0,6; 1; 2; и 3 метра. Продолжительность измерения полярных электропроводностей на каждом уровне составляет около 10 мин., таким образом, на измерение одного профиля необходим 1 час.

Помимо измерения положительной и отрицательной электропроводностей, серия измерений включает в себя определение поправки, связанной с утечкой заряда по изоляции, ионизирующим воздействием материалов измерительного конденсатора и т.п.

Для непрерывного одновременного измерения полярных удельных электропроводностей применяется датчик полярных электрических проводимостей воздуха «Электропроводность-2». В приборе реализуется метод, основанный на измерении тока ионов, осаждающихся из потока воздуха на одну из обкладок конденсатора, между которыми создано электрическое поле. Величина тока ионов пропорциональна значению электропроводности воздуха и приложенному напряжению [1]. Прибор позволяет получить непрерывную запись значений электропроводностей, стандартный предел диапазона измерений 25 фСм м^{-1} . Поскольку величина электропроводности, получаемая в экспедиционных условиях, значительно превышает предельное значение, диапазон измерений прибора был увеличен в 2 раза.

Измерение полярных концентраций легких ионов

Для непрерывной регистрации концентраций положительных и отрицательных аэроионов используется счётчик ионов «Сапфир-3К», который предназначен для измерения концентраций ионов подвижности $k \geq 0,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Датчиком счётчика аэроионов является аспирационная ионная камера, через

которую с помощью двигателя прокачивается исследуемый воздух. С потоком воздуха в аспирационную камеру поступают ионы; в рабочем объеме камеры на них действует электростатическое поле, создаваемое источниками питания камеры. Под действием электростатического поля ионы отклоняются в сторону собирающего электрода и оседают на нем в течение времени накопления заряда. По окончании времени накопления (минимум 4 с), электрический заряд через ключ разряжается на входное сопротивление усилителя. Усиленный импульс преобразуется и измеряется.

Измерение концентрации радона-222

Одновременно с электропроводностью на тех же уровнях радонметром «AlphaGUARD» измеряется объемная радиоактивность радона-222 (Rn-222) в атмосфере, что позволяет судить о концентрации этого газа на соответствующей высоте. Радонметр работает по методу ионизационной камеры. Специальный фильтр прибора обеспечивает попадание внутрь камеры радиоактивного изотопа ${}_{86}\text{Rn}^{222}$, задерживая прочие изотопы, влагу и пыль.

При организации градиентных измерений концентрации радона на каждой высоте осуществляется интенсивная прокачка воздуха с той целью, чтобы осуществить быстрый забор воздушной пробы с нужного уровня в атмосфере. Затем исследуемый воздух диффундирует в ионизационную камеру, что позволяет измерять среднюю объемную активность радона за некоторый интервал времени. Для синхронизации измерений полярных электропроводностей и концентрации радона прибор настроен так, что осреднение объемной активности Rn-222 по времени осуществляется датчиком для 10-минутных интервалов.

Измерение вертикальной составляющей градиента потенциала электрического поля атмосферы

Как известно, методы измерения градиента потенциала (напряженности) электрического атмосферного поля делятся на прямые и косвенные. Прямые методы основаны на использовании соотношения: $E = -\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$, где σ – поверхностная плотность заряда в месте измерения, ε_0 – диэлектрическая

проницаемость воздуха. Косвенные методы основаны на измерении потенциалов относительно земли в определенных точках пространства и последующем расчете градиента потенциала по результатам этих измерений. Измерение потенциала φ обычно производится с помощью коллекторов различных типов, а определение σ и, следовательно, E – динамическим методом с помощью различного рода измерителей потоков электростатической индукции – электростатических флюксометров [2].

В измерительном комплексе для определения напряженности атмосферного электрического поля на уровне земли используется электростатический флюксометр системы ГГО «Поле-2». Напряженность электрического поля преобразуется в электрический ток с помощью ротационного электростатического генератора, в основу которого положено явление электромагнитной индукции. Предел измерения градиента потенциала ± 500 В/м для первого канала, ± 5000 В/м для второго канала.

Измерения электрического потенциала атмосферы в описываемом комплексе осуществляются методом радиоактивного коллектора, в качестве которого взят иониевый α -излучатель. Применявшаяся установка для измерения потенциала атмосферы на различных уровнях, идентична описанной Имянитовым [3]. Деревянные мачты высотой 3 м разнесены на расстояние 10 м. Между ними горизонтально натянуты четыре проволочные антенны диаметром 0,6 мм, изолированные от реек эбонитовыми изоляторами, снабженными нагревательными элементами для поддержания поверхности изолятора сухой. К проволокам прикреплены радиоактивные коллекторы так, что расстояния их от земной поверхности равны 0,5, 1, 2 и 3 метра.

Каждый коллектор создает область повышенной ионизации в объеме порядка 100 см^3 , из которой на антенну текут выравнивающие потенциал токи. Отсчеты потенциалов выполняются многократно, поочередно с разных коллекторов, и затем осредняются, давая среднечасовые значения потенциала для каждого уровня. Время релаксации установки – порядка 40 с, что учитывается при снятии показаний электрометра после пересоединения коллекторов. Для измерения потенциала применяются механические

электрометры или электростатические вольтметры. Наблюдатель с электрометром располагается в десятке метров от коллекторов, чтобы не исказить электрическое поле.

Как известно, значение градиента электрического потенциала можно рассчитать, зная значения потенциала для двух точек (А и В) и расстояние между точками: $grad\varphi_{AB} = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{l_{AB}}$ (рис. 2). На основании данных градиента

потенциала атмосферного электрического поля возможно определение плотности объемного заряда в атмосфере. Связь между локальным объемным зарядом и потенциалом при условии эквипотенциальности горизонтальных

уровней устанавливается уравнением Пуассона: $\frac{d^2\varphi}{dh^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$. Средняя плотность

объемного заряда для любого слоя приземного воздуха рассчитывается по следующей обобщенной формуле: $\rho = \varepsilon_0 \frac{G_2 - G_1}{l_{1-2}}$, где $G_1 = grad\varphi_{BC}$,

$G_2 = grad\varphi_{AB}$ (рис. 2).

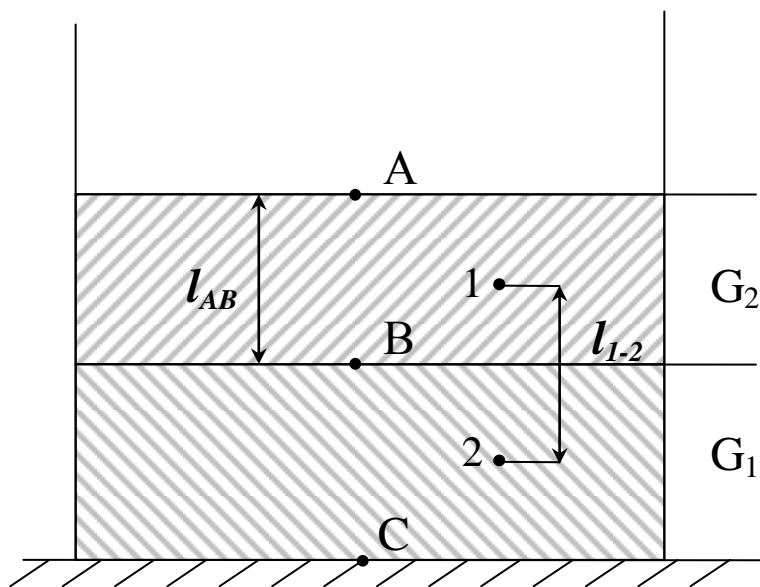


Рис. 2. К определению градиента электрического потенциала и плотности объемного заряда атмосферы

Измерения плотности вертикального тока

Измерение плотности полного тока (i) и плотности тока механического переноса (i_{mn}) из атмосферы на землю ведется методом пластины. В качестве датчиков используются две круглые дюралюминиевые пластины площадью

$\approx 0,2 \text{ м}^2$, покрытые дерном без травостоя. Пластины устанавливаются в вырезе заземленных охранных колец, чтобы избежать значительного искажения напряженности электрического поля. Пластина для измерения плотности тока механического переноса экранируется от электрического поля атмосферы заземленной медной сеткой размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ с ячейками $4 \times 4 \text{ см}^2$, установленной на высоте 20 см над поверхностью пластины. По медным струнам, закрепленным внутри заземленного экрана на фторопластовых изоляторах, сигнал передается от пластин к измерительным приборам (вольтметр-электрометр В7-30).

Поскольку непосредственно измеренная плотность полного тока (i) представляет собой в исследуемых условиях сумму плотности тока проводимости (i_λ) и плотности тока механического переноса (i_{mn}) из атмосферы на землю ($i = i_\lambda + i_{mn}$), плотность тока проводимости на земную поверхность можно подсчитать как: $i_\lambda = i - i_{mn}$.

Метеорологическая информация: методы измерения и расчета метеорологических характеристик приземного слоя

Регистрация метеорологических величин позволяет охарактеризовать физические условия, при которых получены данные атмосферно-электрических измерений. Учитывая многофакторность взаимосвязей между метеорологическими и атмосферно-электрическими процессами, важно выявить наиболее существенные метеорологические факторы, влияющие на процессы формирования электрического состояния атмосферы в приземном слое. Поэтому атмосферно-электрические наблюдения сопровождаются комплексом метеорологических измерений. При установке метеорологических датчиков учитываются рекомендации «Наставлений гидрометеорологическим станциям и постам» [4].

1) Измерение температуры воздуха и почвы

В экспедиционных условиях для измерения температуры воздуха, а также его влажности, применяют портативный прибор - аспирационный психрометр Ассмана МВ-4М. Точность психрометра достаточно высока для использования

полученных данных о температуре воздуха при подсчете коэффициента турбулентности.

Измерения температуры производятся на высотах 0.15 м, 0.50 м, 1.0 м, 2.0 м в начале каждого часа.

Для измерения температуры почвы на глубине 0.05м, 0.10м, 0.15м, 0.20м используются почвенные термометры Савинова.

2) Измерение скорости ветра

Для измерения скорости ветра использовался чашечный механический анемометр МС-13. Анемометр дает осреднение скорости ветра за некоторый промежуток времени. В экспедиционных условиях используется 7- минутное осреднение.

Для оценки средней скорости и направления вертикальных потоков воздуха используется крыльчатый анемометр АСО-3, который включается на 7 минут одновременно с чашечным анемометром.

3) Визуальная информация

Визуально определяется сила ветра по шкале Бофорта, порывистость и направление ветра. Наблюдения ведутся за видом и количеством облачности. Отмечается наличие факторов, помутняющих атмосферу (дымка, туман, пыль, дым и т.д.) и время выпадения росы.

4) Расчет коэффициента турбулентности

Коэффициент турбулентности D_T рассчитывается по методу Орленко [5] на основании данных о температуре воздуха и скорости ветра на высотах 0,5 и 2 метра.

Автоматизация измерительного комплекса

Проблема автоматизации рано или поздно встает практически в любой области сбора, обработки и анализа данных. Необходимость в автоматизации атмосферно-электрических измерений, обработке данных с применением ПК возникла с распространением вычислительной техники и увеличением комплекса измеряемых величин. Обеспечить ввод информации в аналоговом

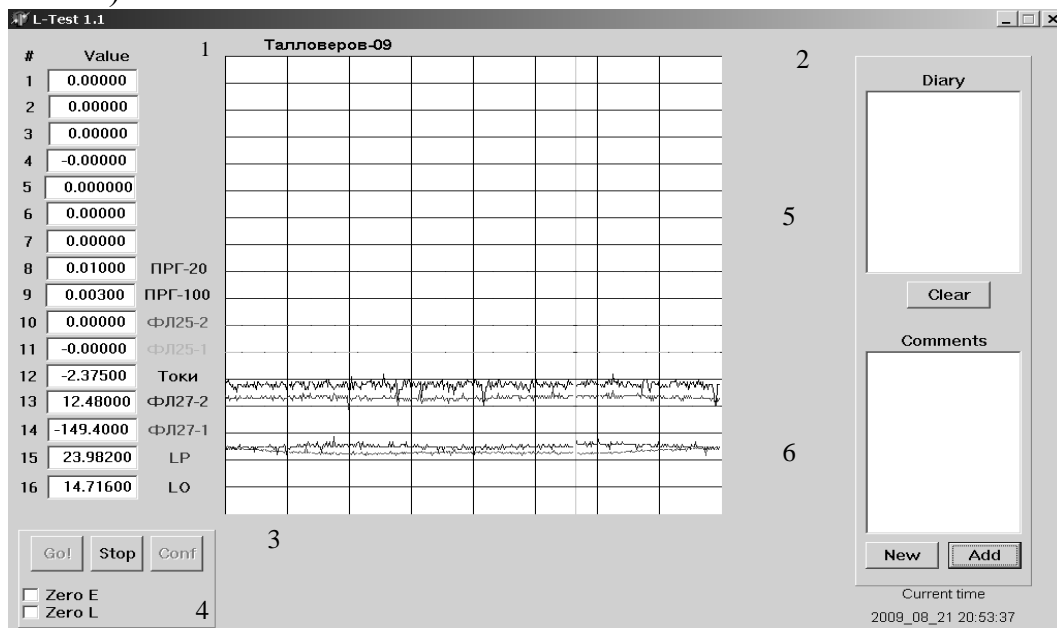
представлении данных в компьютер с последующей обработкой позволяет устройство аналого-цифрового преобразования (АЦП).

Устройства АЦП характеризуются различными параметрами, среди которых основными являются скорость преобразования (частота АЦП), допустимые пределы измеряемых величин, точность преобразования, количество опрашиваемых каналов. Поэтому важно подобрать плату именно под свои нужды. С учетом поставленной задачи: длительный по времени опрос большого количества датчиков, выдающих сигналы от милливольт до нескольких вольт, - выбор пал на PCI плату АЦП L-Card L-761. Форм-фактор платы PCI обеспечивает высокую скорость приема данных, а встроенный сигнальный процессор при надлежащем программировании позволяет вести обработку результатов измерений в режиме реального времени.

Для приема данных была разработана управляющая и регистрирующая программа «L-Test 1.1», которая ведет запись данных с каждого из каналов в файл, отображает графики зависимости сигналов от времени, позволяет настраивать различные параметры приема каждого из сигналов. Пример окна работающей программы представлен на рисунке 3а. Максимальный размер файла за час работы при ежесекундной регистрации составляет порядка 3 Мб, что позволяет вести непрерывные наблюдения в течение многих дней. Таким образом, обеспечивается преобразование сигналов с выходов электростатического флюксметра «Поле-2», прибора для измерения полярных электрических проводимостей «Электропроводность-2», грозорегистраторов типа ПРГ-20 и ПРГ-100, регистрирующих разряды в радиусе 20 и 100 км соответственно, прибора для измерения вертикальных токов.

В автоматизированном комплексе используются также датчики, которые выдают сигнал в цифровой форме и имеют возможность подключения к компьютеру напрямую, минуя устройство АЦП. Такими датчиками являются цифровая метеорологическая станция М49-М и счетчик аэроионов «Сапфир-3К», каждый из них имеет собственное программное обеспечение. На рисунках 3б, 3в представлены окна программы регистрации концентраций полярных

легких ионов («Sapphire3m06») и метеорологических величин («Просмотр метеоданных»).



- 1 – окна вывода числовых значений измеряемых величин (1-16 каналы АЦП)
 2 – окно графической развертки
 3 - управляющие кнопки режимов
 4 – переключатели режима записи нуля
 5 – окно записи технических комментариев
 6 - окно записи метеорологической обстановки

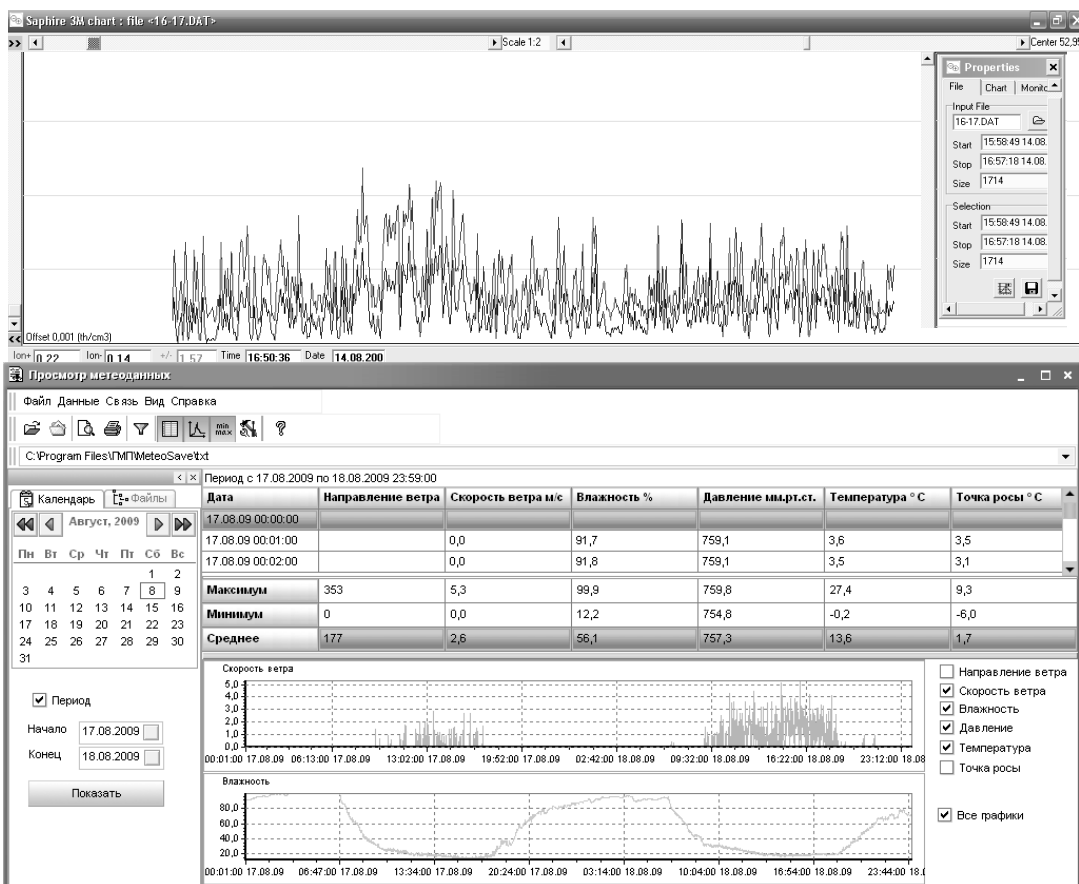


Рис. 3а. Вид окна программы L-Test 1.1.

Рис. 3б. Вид окна программы регистрации концентраций полярных легких ионов «Sapphire3m06»

Рис. 3в. Вид окна программы регистрации метеорологических элементов с помощью цифровой метеостанции М49-М «Просмотр метеоданных»

В настоящее время разрабатывается соответствующая программа для автоматизации централизованной обработки регистрируемых величин.

Заключение

Дальнейшее развитие экспедиционных исследований может идти в направлении расширения измеряемых параметров (например, концентрации аэрозолей субмикронного диапазона, плотности объемного заряда, спектра ионов и т.д.) для более точного описания электрических свойств приземного слоя атмосферы.

Список литературы:

1. *Соколенко Л.Г., Шварц Я.М.* Датчик электрической проводимости воздуха // Труды ГГО. Л.: Гидрометеиздат. 1990. Вып. 527. С. 33-36.
2. *Колоколов В.П., Шварц Я.М.* Методы наблюдений элементов атмосферного электричества. Обзор. Обнинск, ВНИИГМИ – МЦД, 1976. 64 с.
3. *Имянитов И.М.* Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: ГТТИ, 1957. 483 с.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. Л.: ГМИ, 1958. 40 с.
5. *Орленко Л.Р.* Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 270с.