

УДК 53.087.45

© С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев

АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА АЭРОСТАТНЫХ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Исследования электричества атмосферного пограничного слоя предполагают проведение долгосрочных геофизических и метеорологических наблюдений, включающих высотные профили электрической проводимости воздуха, напряженности атмосферного электрического поля, концентрации аэрозолей и объемной активности радона (^{222}Rn). Для осуществления наблюдений в Геофизической обсерватории "Борок" ИФЗ РАН разработан и изготовлен опытный образец аппаратной платформы для проведения высотных аэроэлектрических наблюдений с использованием привязного гелиевого аэростата. Платформа оснащена уникальным оборудованием для измерения напряженности атмосферного электрического поля и полярных удельных электрических проводимостей воздуха, а также радон-монитором и датчиком аэрозолей. В ходе проектирования оборудования решен ряд методических и конструкционных задач, связанных с разработкой и изготовлением оборудования для изучения электрического состояния атмосферного пограничного слоя.

Кл. сл.: атмосферное электрическое поле, электрическая проводимость воздуха, атмосферный пограничный слой, аэростатные полевые наблюдения, электрометрия, радиометрия, аэрозоли, легкие ионы

ВВЕДЕНИЕ

Формирование атмосферного электрического поля и глобальной электрической цепи остается одной из нерешенных проблем современной геофизики [1]. Базовые принципы проведения атмосферных электрических наблюдений представлены в монографиях И.М. Имянитова и др. [2–4]. Для исследования электричества атмосферного пограничного слоя (АПС) на Геофизической обсерватории "Борок" ($58^{\circ}04' \text{ N}$; $38^{\circ}14' \text{ E}$) в условиях отсутствия промышленных помех и атмосферных загрязнений регулярно проводятся обсерваторские и полевые аэроэлектрические наблюдения. Наземный аппаратный комплект состоит из токового коллектора, электростатических флюксметров, датчиков электропроводимости воздуха, пиранометра, радон-монитора и метеорологического оборудования [5]. Токовый коллектор предназначен для измерения плотности вертикального атмосферного электрического тока и представляет собой кольцо металлической проволоки диаметром 300 м, закрепленное на изоляторах на высоте 4 м над землей. Электростатические флюксметры типа Field-Mill применяются для измерения вертикальной компоненты напряженности атмосферного электрического поля. Датчики электропроводимости воздуха измеряют удельную электрическую проводимость воздуха, образованную как легкими отрицательными, так и легкими положительными аэроионами. Пиранометр предназначен для изме-

рения плотности потока солнечного излучения. Радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 применяется для непрерывного мониторинга объемной активности радона у поверхности земли. Метеорологическое оборудование состоит из двух ультразвуковых метеостанций "МЕТЕО-2Н", расположенных на высоте 2 и 10 м над поверхностью земли. Результаты геофизических наблюдений служат входными параметрами численной модели электродинамического состояния АПС [6]. Необходимость получения оперативной натурной информации о вертикальных атмосферных электрических профилях до высот 2 км обусловило разработку уникального аэростатного оборудования и методических решений для высотных аэроэлектрических наблюдений. Цель работы заключается в создании измерительного аппаратного комплекса для проведения аэростатных наблюдений высотных электрических профилей АПС.

ОПИСАНИЕ АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Общее описание

С целью исследования вертикальных профилей электричества АПС разработано аппаратное и программное обеспечение, построен опытный образец аэростатной платформы и проведены экспериментальные полевые измерения. Подъем аэростатной платформы выполняется привязным аэродинамическим аэростатом Au-6 производства

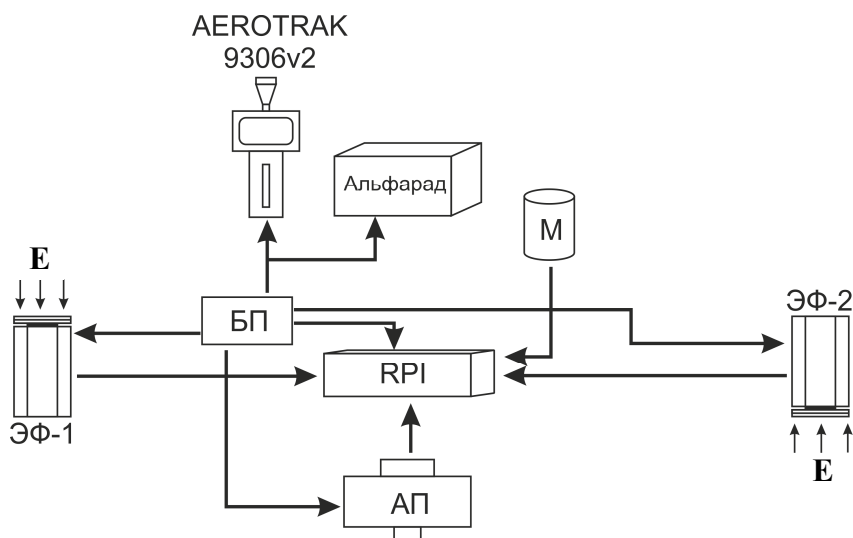


Рис. 1. Структурная схема аэростатной платформы.

Условные обозначения: АП — датчик полярных удельных электрических проводимостей воздуха; ЭФ-1 и ЭФ-2 — датчики напряженности атмосферного электрического поля (электростатические флюксометры); Альфарад — радиометр объемной активности ^{218}Po ; AEROTRAK 9306v2 — датчик концентрации аэрозольных частиц, М — метеорологические датчики и датчики телеметрии; RPI — модуль управления; БП — блок питания

ООО "Авгур — Аэростатные Системы", Россия. Аэростат представляет собой оболочку, наполняемую гелием, и имеет в рабочем состоянии следующие габариты: длина 10,5, максимальный диаметр 4 м. Грузоподъемность данного аэростата по паспорту составляет 25 кг, а рабочий объем — 75 м³. Грузоподъемная характеристика аэростата являлась основным ограничивающим требованием при проектировании платформы.

Платформа аэростата представляет собой каркас в виде шестигранной призмы из алюминиевого профиля и штанги из алюминиевой трубы длиной 3 м. На концах штанги закреплены электростатические флюксометры ЭФ-1 и ЭФ-2 (см. рис. 1). Внутри каркаса расположены датчик полярных удельных проводимостей воздуха АП, датчик концентрации аэрозолей AEROTRAK 9306v2, датчик объемной активности радона Альфарад, датчики температуры, влажности и барометрический альтиметр (рис. 1, М), акселерометр-гироскоп, GPS, система сбора данных RPI и источник питания БП.

На рис. 2 представлены фотографии платформы во время профилактических работ (а), и во время полевых испытаний с аэростатом Аи-6 (б).

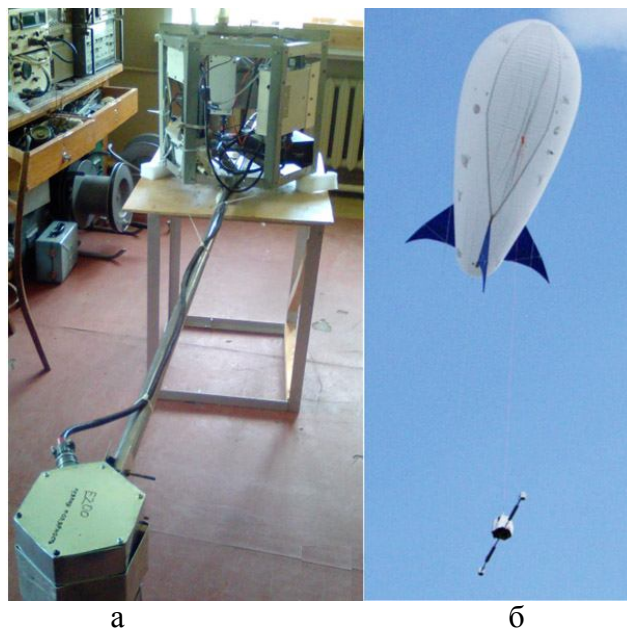


Рис. 2. Аппаратная платформа (а) совместно с аэростатом (б)

Электростатические флюксометры

Электростатические флюксометры, установленные на платформу, обладают следующими характеристиками.

Диапазон измерений	± 12 кВ/м
Разрешение по амплитуде	0.01 кВ/м
Разрешение по частоте	25 Гц
Уровень шумов	1.5 В/(м·Гц ^{1/2})
Потребляемая энергия	3 Вт
Масса	1 кг

Флюксометры установлены так, что совокупно представляют собой дифференциальную измерительную пару. Это необходимо для устранения влияния собственного электрического заряда платформы на результат измерений неискаженно электрического поля. Так как измерительные пластины одного из флюксометров направлены вверх, а второго вниз, величина измеряемой вертикальной компоненты атмосферного электрического поля в результирующих данных будет отражена противофазным изменением показаний

флюксометров. Влияние собственного заряда платформы будет отражено как синфазное изменение. Применение дифференциальной пары флюксометров позволило оценить влияние заряда платформы на измеряемую величину. Опытные образцы электростатических флюксометров, которые спроектированы и изготовлены в лабораториях ГО "Борок" ИФЗ РАН, содержат ряд инновационных технических решений.

Датчик полярных удельных электропроводностей воздуха

Датчик электрической проводимости воздуха расположен внутри каркаса платформы. Датчик устроен по принципу аспирационного конденсатора (конденсатор Гердиена) [5]. Основными элементами прибора служат два аспирационных конденсатора, каждый из которых снабжен собственным электрометрическим усилителем и системой питания. Прибор позволяет одновременно измерять полярные проводимости, обусловленные положительными и отрицательными легкими аэроионами. Характеристики датчика электрической проводимости воздуха.

Диапазон измерений

0.2–260 фСм/м

Чувствительность

0.1 фСм/м

Диапазон регистрируемых

1.6–3.0 см²/(В·с)

подвижностей аэроионов

Частота дискретизации

1 Гц

Потребляемая мощность

3 Вт

Масса

2 кг

Данные о полярных удельных электрических проводимостях воздуха, получаемые с прибора, дают возможность путем параметризации подвижности аэроионов оценить величину плотности объемного электрического заряда, сосредоточенного на легких ионах, и интегральную концентрацию легких ионов [7]. Полученные данные позволяют вычислить полную удельную электрическую проводимость воздуха.

Характеристики других приборов комплекса

Платформа оснащена серийно производимым радиометром "Альфарад плюс-А", измеряющим объемную активность ²¹⁶Po, который является продуктом распада ²²²Rn. Таким образом, прибор позволяет получить объемную активность ²²²Rn в воздухе. Концентрация аэрозолей измеряется прибором TSI AEROTRAK 9306v2. Этот прибор позволяет измерять концентрацию аэрозольных частиц в шести диапазонах диаметров от 0.3 до 25 мкм с разрешением по времени в 1 мин.

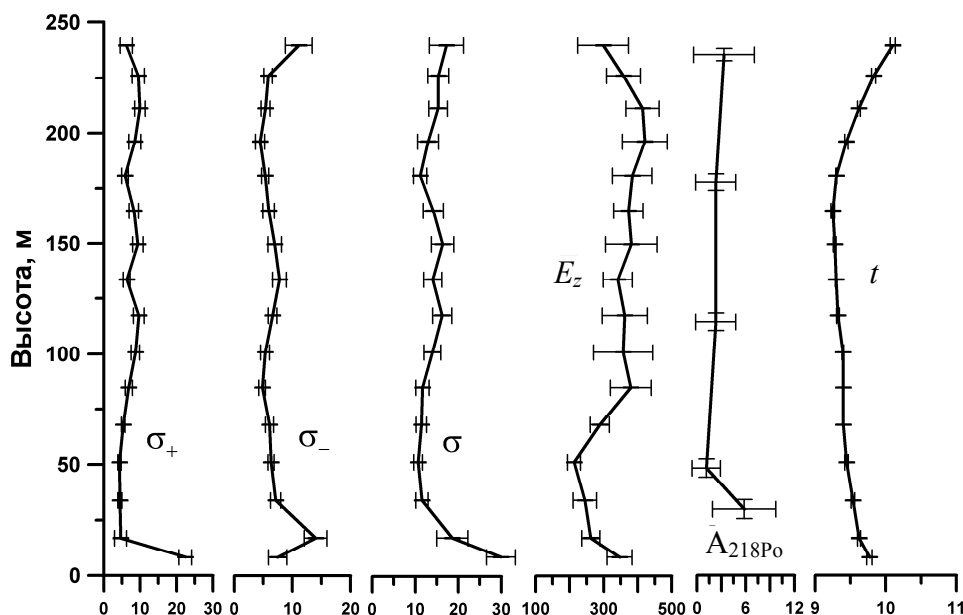


Рис. 3. Вертикальные профили параметров АПС по данным аэростатных наблюдений ГО "Борок" ИФЗ РАН 28.09.2016, 17:01-18:19 (время московское). Удельные электрические проводимости воздуха: полярная положительная σ_+ [фСм/м] и отрицательная σ_- [фСм/м]; полная удельная электрическая проводимость воздуха σ [фСм/м]; напряженность атмосферного электрического поля E_z [В/м], объемная активность ²¹⁸Po (A_{218Po} [Бк/м³]) и температура воздуха t [°C]

Измерительное оборудование, датчики телеметрии, метеодатчики и GPS-приемник подключены к автоматизированной системе сбора данных, построенной на базе одноплатного компьютера RaspberryPi 3, работающего под управлением операционной системы "Debian GNU/Linux". Источником питания всей системы служит импульсный блок питания, формирующий необходимые напряжения для различных модулей платформы, и литий-ионный аккумулятор емкостью 285 Вт·ч. При полной нагрузке ресурс аккумулятора составляет 8 ч. При питании только флюксометров, датчиков проводимости, телеметрии, метеодатчиков и системы сбора ресурс аккумулятора — более 12 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытный образец аэростатной платформы, разработанный и изготовленный в ГО "Борок" ИФЗ РАН, испытан в полевых условиях среднеширотных природных атмосферных электрических наблюдений сезона 2016 г. На рис. 3 представлены результаты наблюдений вертикальных профилей полярных (σ_+ , σ_-) и полной (σ) удельных электрических проводимостей воздуха, напряженности атмосферного электрического поля (E_z), объемной активности ^{218}Po и температуры воздуха. Полученные результаты используются в численной электроаэродинамической модели состояния атмосферного пограничного слоя [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-17-10209) и РФФИ (грант № 15-05-04960).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.
2. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 420 с.
3. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: Гостехиздат, 1957. 483 с.
4. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 239 с.
5. Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11-12. С. 787–802.
6. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 4. С. 445–454.
7. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 312 с.

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Геофизическая обсерватория "Борок", Ярослав. обл.*

Контакты: Афиногенов Константин Викторович,
arhin@borok.yar.ru

Материал поступил в редакцию: 17.01.2017

HARDWARE PLATFORM FOR BALLOON AEROELECTRICAL OBSERVATIONS

S. V. Anisimov, K. V. Aphinogenov, A. V. Guriev

Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Yaroslavsky Reg., Russia

An atmospheric boundary layer electricity investigation involves long-term geophysical and meteorological observations, including air electric conductivity, atmospheric electrical field strength, aerosol particles concentration and radon (^{222}Rn) volume activity altitude profiles measurement. A prototype of the helium-filled balloon platform for altitude aeroelectrical profiles observations was developed and manufactured in Borok Geophysical Observatory. The platform is equipped with unique scientific equipment for measurement of atmospheric electrical field strength, polar air electrical conductivities, radon volume activity and aerosol particles concentration. A number of methodical and structural problems associated with atmospheric boundary layer investigations equipment development and manufacturing were success fully solved.

Keywords: atmospheric electric field, atmospheric electric conductivity, atmospheric boundary layer, balloon field observations, electrometry, radiometry, aerosols, light ions

REFERENCES

1. Anisimov S.V., Mareev E.A. [Geophysical surveys of a global electric circuit]. *Fizika Zemli* [Physics of Earth], 2008, no. 10, pp. 8–18. (In Russ.).
2. Chalmers J.A. *Atmospheric electricity*. Pergamon Press, 1957 (Russ. ed.: Chalmers Dz. *Atmosfernoe elektrichestvo*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 420 p.).
3. Imyanitov I.M. *Pribory i metody dlya izucheniya elektrichestva atmosfery* [Devices and methods for atmosphere electricity studying]. Moscow, Gostechizdat Publ., 1957. 483 p. (In Russ.).
4. Imyanitov I.M., Chubarina E.V. *Elektrichestvo svobodnoy atmosfery* [Electricity of the free atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 239 p. (In Russ.).
5. Anisimov S.V., Shichova N.M., Afinogenov K.V. [Dynamics of electricity of the nonperturbed atmosphere of middle latitudes: from observations to a skeyling]. *Izv. vuzov. Radiofizika* [News of higher education institutions. Radio physics], 2013, vol. 56, no. 11-12, pp. 787–802. (In Russ.).
6. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shichova N.M., Afinogenov K.V. [Electricity of a convective atmospheric boundary layer: natural observations and numerical modeling]. *Fizika atmosfery i okeana* [Physics of the atmosphere and ocean], 2014, vol. 50, no. 4, pp. 445–454. (In Russ.).
7. Smirnov V.V. *Ionizatsiya v troposfere* [Ionization in the troposphere]. S.-Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 312 p. (In Russ.).

Contacts: *Afinogenov Konstantin Viktorovich*,
aphin@borok.yar.ru

Article received in edition: 17.01.2017