

УДК 551.594:550.3

© С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов

Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Ярославская обл., п. Борок
svga@borok.yar.ru

ТРАНСПОРТ РАДОНА И ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Статья поступила в редакцию 04.05.2016, после доработки 12.10.2016.

Обсуждаются механизмы влияния стратифицированной турбулентности на формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя и вариабельность электрических параметров. В результате натурных наблюдений и численного моделирования установлено, что развитие конвекции в атмосферном пограничном слое приводит к уменьшению электрической проводимости вблизи поверхности земли. Для расчетов использована стохастическая электродинамическая модель, воспроизводящая эволюцию высотных профилей электрической проводимости и напряженности аэроэлектрического поля в невозмущенном осадками и грозовой активностью нижнем слое атмосферы над сушей средних широт. Показано, что связанное с конвекцией усиление генерации турбулентности, сопровождающееся увеличением турбулентной кинетической энергии и дисперсии флуктуаций вертикальной скорости, способствует более интенсивному вертикальному перемешиванию радона и радиоактивных дочерних продуктов. При этом вертикальный перенос радона приводит к более однородному высотному распределению электрической проводимости и увеличению напряженности поля в приземном слое. Выполнены оценки вариабельности электрической проводимости и напряженности аэроэлектрического поля, определяемых эмиссией радона, ионизацией воздуха, разделением зарядов на неоднородностях электрической проводимости, турбулентным транспортом радиоактивных элементов и объемных электрических зарядов. Предполагается, что высотные аэроэлектрические профили могут служить объективными и оперативными параметрами состояния атмосферного пограничного слоя.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, турбулентный транспорт, вариабельность, радон, электрическая проводимость, электрическое поле.

S. V. Anisimov, S. V. Galichenko, K. V. Aphinogenov

Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

THE RADON TRANSPORT AND THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ELECTRIC STATE FORMATION

Received 04.05.2016, in final form 12.10.2016.

The mechanisms of influence of stratified turbulence to the formation of the atmospheric boundary layer electric state and the variability of electric parameters are discussed. As a result of the field observations and numerical modeling, it is found that the development of convection in the atmospheric boundary layer reduces the electric conductivity near the surface. The stochastic electrodynamic model, reproducing the evolution of the vertical profiles of electric conductivity and aroelectric field intensity in the lower troposphere of mid-latitudes land undisturbed by precipitations and thunderstorms, is used for the calculations. The results show that the increased turbulence generation due to convection accompanied by an increase of the turbulent kinetic energy and the variance of vertical turbulent velocity tends to more intensive vertical mixing of radon and its short-lived daughters. In this case, the turbulent transport of radon leads to more uniform vertical distribution of the electric conductivity and an increase of the aroelectric field intensity in the surface layer. Estimations of the variability of electric conductivity and aroelectric field intensity, caused by radon emissions, air ionization, charge separation on the electric conductivity inhomogeneities, turbulent transport of radioactive elements and space charge, are performed. It is assumed that altitudinal aroelectric profiles can be objective and operative parameters of the atmospheric boundary layer turbulent conditions.

Key words: atmospheric boundary layer, turbulent transport, variability, radon, electric conductivity, electric field.

Ссылка для цитирования: Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В. Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 4. С. 7—14.

For citation: Anisimov S. V., Galichenko S. V., Aphinogenov K. V. The radon transport and the atmospheric boundary layer electric state formation. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 4, 7—14.

Атмосферный пограничный слой (АПС) представляет собой нижнюю часть тропосферы, на которую существенное влияние оказывает шероховатость и термический режим подстилающей поверхности. Через АПС осуществляется обмен импульсом, теплом, водой и малыми атмосферными составляющими между поверхностью земли или океана и свободной атмосферой. Для АПС свойственна интенсивная турбулентность, одним из механизмов генерации которой является развитие конвективной неустойчивости и вертикальной циркуляции. Другой источник турбулентности обусловлен вертикальным сдвигом ветра, который характерен для большей части ночного устойчивого АПС, а также наблюдается в конвективном АПС вблизи поверхности и в области турбулентного взаимодействия конвекции со свободной атмосферой. Величина сдвига ветра главным образом зависит от скорости геострофического ветра, определяемой по горизонтальному градиенту давления. Радиационный форсинг и теплопроводность прилегающего к поверхности вязкого подслоя формируют в АПС режим турбулентности, который определяет вертикальный перенос субстанций, имеющих, вообще говоря, нестационарные и неоднородные источники и стоки как в атмосфере, так и на земной поверхности. В термодинамическом смысле АПС представляет собой неравновесную систему с самоорганизацией и характеризуется совокупностью процессов, протекающих в диапазоне пространственно-временных масштабов, охватывающем несколько декад по каждой шкале [1, 2].

В рамках аэроэлектрической стратификации АПС рассматривается как участок глобальной электрической цепи, характеризующийся существенным вкладом в электрическое сопротивление всей атмосферы, несмотря на малую толщину по сравнению с расстоянием от нижних слоев ионосферы до земной поверхности, и значительной электродинамической вариабельностью даже в невозмущенных условиях [3, 4]. Электрическая проводимость атмосферы обусловлена наличием в воздухе ионов, образующихся под воздействием космических лучей, радиоактивного излучения верхнего слоя (толщиной ~ 0.1 м) земной коры и последовательности радиоактивных распадов изотопов радона, проникающих в атмосферу в результате эсхалиции из грунтовых пород и почвенной диффузии. После акта ионизации молекулярные ионы включаются в цепочку физико-химических превращений, заканчивающихся рекомбинацией. В результате присоединения ионов к аэрозольным частицам образуются тяжелые и средние ионы, имеющие малую по сравнению с легкими ионами подвижность, и потому не влияющие на электрическую проводимость. Внося существенный вклад в глобальную ионизацию АПС, радон и продукты его распада определяют значительную часть изменчивости интенсивности ионообразования в АПС над сушей [5].

Вследствие экстремально низкой электрической проводимости воздуха в АПС и нижней тропосфере ($\sim 10^{-14}$ См/м) время релаксации сформировавшихся в неоднородных условиях объемных электрических зарядов по порядку величины совпадает с характерным временем декорреляции вертикальной скорости их турбулентного движения [6]. Перенос заряженных частиц аэрозоля и ионов атмосферными движениями дает существенный вклад в короткопериодную (0.1—1000 Гц) вариабельность аэроэлектрического поля [7], и будучи не связанным с направлением вектора глобального атмосферного электрического поля, обеспечивает непрерывно действующую ЭДС так называемого турбулентного электрического тока [8—10]. Наблюдения высотных профилей напряженности атмосферного электрического поля в утренние часы, выполненные при помощи привязного аэростата, поднимавшегося до высоты около 700 м над землей, показали увеличение вскоре после восхода солнца толщины слоя положительного объемного заряда, сопровождаемое соответствующим уменьшением в нем плотности электрического заряда. При этом в некоторые дни наблюдался аномальный рост напряженности поля, которому предшествовало увеличение плотности объемного положительного заряда вблизи земной поверхности до установления режима развитой конвекции [11].

Цель работы заключается в исследовании влияния турбулентного транспорта радона на формирование электрического состояния АПС, в оценке вариабельности электрического состояния АПС, связанной с суточным ходом радиационного форсинга, а также сменой стратификации и влиянием вертикального переноса и распределения радона. В настоящей работе используется стохастическая электродинамическая модель, позволяющая воспроизводить эволюцию высотных профилей электрической проводимости и напряженности аэроэлектрического поля в невозмущенном осадками и грозовой активностью нижнем слое атмосферы над сушей средних широт.

Натурные атмосферные наблюдения. Результаты длительных непрерывных наблюдений на Геофизической обсерватории «Борок» указывают на наличие связи термодинамического и турбулентного режима АПС с величиной и характером вариабельности объемной активности радона и напряженности аэроэлектрического поля [12]. Пример синхронных регистрограмм показан на рис. 1 (см. вклейку). В период 12.05—3.10.2014 г. на полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] в условиях отсутствия промышленных загрязнений и электромагнитных помех проводились сезонные полевые натурные наблюдения электрических характеристик атмосферы: вертикальной компоненты напряженности атмосферного электрического поля, плотности вертикального атмосферного электрического тока, полярных удельных электрических проводимостей воздуха, а также объемной активности радона и метеорологических параметров. Аппаратное обеспечение, задействованное в ходе наблюдений, состояло из электростатических флюксометров типа «field mill», токового коллектора, датчика полярных проводимостей воздуха, датчика объемной активности радона AlphaGUARD PQ2000, цифровых ультразвуковых метеостанций и акустического локатора Scintec MFAS. Акустический локатор Scintec MFAS использовался для измерения высотных профилей среднего ветра и характеристик турбулентности 30—1000 м над поверхностью земли с вертикальным разрешением до 10 м и временем усреднения 1—60 мин. Две автоматизированных ультразвуковых метеостанции «МЕТЕО-2Н», предназначенные для измерения в приземном слое атмосферы турбулентных пульсаций температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра, средних значений температуры воздуха, скорости и направления ветра, были расположены на высотах 2 и 10 м. Кроме указанных параметров метеостанции определяют средние значения атмосферного давления в диапазоне 600—800 мм рт. ст. и относительной влажности воздуха в диапазоне 10—98 %, а также ряд величин, характеризующих энергетические и статистические свойства турбулентности. Электростатические флюксометры и датчики полярных проводимостей располагались в направлении восток-запад с расстоянием 10 м друг от друга. Пять электростатических флюксометров устанавливались на высоте 1 м от поверхности земли, один флюксометр располагался на уровне поверхности земли, один в перевернутом состоянии на высоте 1 м от поверхности земли. Датчик полярных проводимостей был установлен на высоте 1 м от поверхности земли. Чувствительность радонмера AlphaGUARD составляла не меньше 1 отсчета в минуту при объемной активности в воздухе 20 Бк/м³, диапазон измерений 2—2·10⁶ Бк/м³, длительность одного измерения 10 мин. В августе 2014 г. в состав аппаратного обеспечения был включен метеорологический температурный СВЧ профилемер МТП-5, обеспечивающий дистанционное измерение высотных профилей температуры атмосферы в диапазоне высот от уровня установки прибора до 1000 м с разрешением по высоте 25 м до 100 м и 50 м выше 100 м. Измерение профиля проводится каждые 5 мин. Точность измерений изменяется в пределах от 0.2 до 1.2 °С при изменении высоты от уровня установки прибора до 1000 м.

Основные принципы построения электродинамической модели АПС. Электродинамическая модель АПС состоит из нескольких взаимодействующих между собой частей [6, 13]. Блок кинетики заряженных частиц включает описание процессов рождения и рекомбинации ионов, а также зарядки и нейтрализации заряда аэрозольных частиц легкими ионами с использованием уравнений баланса соответствующих фракций. Учет вклада радиоактивных эманаций в ионообразование осуществляется на основе уравнений последовательности радиоактивных распадов изотопов радона ²²²Rn и ²²⁰Rn. Так как радиационные потери α - и β -частиц, образующихся при радиоактивных превращениях в этих цепочках, пренебрежимо малы по сравнению с ионизационными потерями, локальная интенсивность образования ионных пар пропорциональна суммарной кинетической энергии вылетающих частиц, т. е. объемной активности изотопов радона и короткоживущих продуктов их распада. Термодинамический блок модели содержит прогностические уравнения для высоты АПС и критерий для определения типа стратификации, включающий в себя анализ масштаба Монина—Обухова и определение знака квадрата частоты Брента—Вяйсяля. Статистические характеристики турбулентности, полученные в ходе натурных наблюдений, используются при построении стохастических дифференциальных уравнений для расчета траекторий элементов среды — лагранжевых частиц, реализующих блок турбулентного транспорта субстанций. Кинематический или траекторный метод лагранжевых частиц основан на статистическом описании турбулентности в координатах Лагранжа, т. е. системе отсчета, связанной с элементом объема, движущимся вместе с потоком. Идея метода состоит в замене уравнения Навье—Стокса стохастическим линейным уравнением, которое вместо квадратичной нелинейности содержит члены, опи-

сывающие процессы, которые имитируют локальные и нелокальные взаимодействия. Если турбулентное течение характеризуется полем скоростей $v_i(r, t)$, и некоторая процедура фильтрации позволяет отделить поле скоростей крупномасштабных движений $U_i = \hat{F}(v_i)$ от поля скоростей мелкомасштабных движений $u_i = v_i - U_i$, то отношение характерных времен изменения компонент скорости соответствующих полей определяется отношением пространственных масштабов $t/T \sim (l/L)(U/u) \sim (l/L)^{2/3}$, выражающим свойство подобия локальной турбулентности. Вследствие более быстрого изменения мелкомасштабных компонент, они рассматриваются как случайный шум, наложенный на движение крупномасштабных движений, и для эволюции компонент скорости используется обобщенное уравнение Ланжевена, содержащее стохастический член, который имитирует воздействие случайных сил, приложенных к рассматриваемому элементу объема. Практическая реализация лагранжевой стохастической модели основана на предположении, что эволюция скорости и координаты выделенного элемента объема могут быть описаны как марковский процесс с заданными характеристиками [14, 15]. Для АПС и свободной атмосферы типичны условия стратифицированной турбулентности, поэтому описание транспорта через границу слоев с различными турбулентными режимами в рамках лагранжева подхода дополняется условиями сопряжения [16]. Электродинамический блок состоит из уравнений Максвелла, уравнения непрерывности и линейной связи плотности вертикального тока проводимости с напряженностью поля (закона Ома).

С целью диагностики суточной вариабельности типа стратификации и высоты АПС, а также верификации термодинамического блока модели был проведен анализ высотных профилей потенциальной температуры, полученных в результате обработки данных зондирования атмосферы профилемером МТП-5. Было установлено, что наиболее существенная причина неопределенности в прогнозе скорости турбулентного вовлечения и развития конвективного АПС заключается в чувствительности одномерных bulk-моделей к величине градиента потенциальной температуры над областью турбулентного вовлечения, которая в реальной атмосфере обладает значительной вариабельностью.

Временное разрешение (шаг модели) составляет 1 с, что, с одной стороны, много меньше времен декорреляции вертикальной скорости, а также турбулентной и омической диссипации электрического заряда, а с другой, укладывается в инерционный интервал атмосферной турбулентности, и поэтому удовлетворяет критерию применимости лагранжевой стохастической модели. В этой работе расчеты выполнены с использованием равномерного вертикального разбиения и пространственным разрешением 2 м.

Вертикальное распределение радона и электрическая проводимость. Ранее проведенные исследования установили влияние стратификации АПС, условий перемешивания и наличия облачности на вертикальное распределение объемной активности радона [17—19]. Так, в случае ночного устойчивого АПС радон аккумулируется вблизи земной поверхности, что приводит к увеличению объемной активности [20, 21]. При помощи вихреразрешающей модели, воспроизводящей турбулентную динамику АПС в течение суток, было показано, что концентрации и объемные активности изотопа радона ^{222}Rn , и короткоживущих продуктов его распада ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi увеличиваются в ночной период, при формировании устойчивой стратификации АПС, препятствующей вертикальному распространению распадающихся элементов. Развитие конвекции в утренние часы уменьшает концентрации радиоактивных элементов вблизи земной поверхности. Установление конвективного режима обеспечивает эффективное вертикальное перемешивание радона и дочерних продуктов во всем АПС, восстанавливая нарушенное ночью секулярное равновесие между ^{222}Rn и короткоживущими продуктами его распада [22, 23].

Результаты расчетов на основе нестационарной стохастической модели вертикального турбулентного транспорта радиоактивных, аэрозольных и электрически заряженных субстанций в неоднородно стратифицированной атмосфере [6, 13] в части воспроизведения суточного хода вертикального распределения радона и его дочерних продуктов (рис. 2, см. вклейку) показали качественное и частично количественное согласие с результатами вихреразрешающего моделирования, выполненного в [22, 23].

Параметризация модели основана на результатах обработки и анализа совокупности локальных, региональных и глобальных переменных, как натурных обсерваторских наблюдений, так и результатов, полученных другими исследователями [24—28]. К указанным переменным относятся нестационарные высотные профили потенциальной температуры, статистических моментов функции распределения турбулентных пульсаций скорости ветра и скорости диссипации турбулентной кинетической энергии

в тепло, масштаб Монина—Обухова, вертикальный турбулентный поток тепла, напряжение Рейнольдса вблизи земной поверхности, ионосферный потенциал, высотная зависимость электрической проводимости в свободной атмосфере, скорость эмиссии в атмосферу изотопов радона, высотные профили концентрации и функция распределения аэрозольных частиц по размерам. Так как цель состояла в исследовании вариабельности электрического состояния АПС, связанной с суточным ходом радиационного форсинга, сменой стратификации и влиянием вертикального переноса и распределения радона, то параметры, не участвующие в определении термодинамического состояния и статистических характеристик турбулентности АПС, полагались постоянными. Конкретные значения параметров принимались следующими: 1) скорость эмиссии изотопа ^{222}Rn $10^4 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$; 2) средняя счетная концентрация аэрозольных частиц $1.75 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$; 3) масштаб высоты в зависимости экспоненциального роста электрической проводимости с высотой в свободной атмосфере 4.3 км; 4) электрическое сопротивление столба атмосферы от нижнего слоя ионосферы до поверхности земли $2.2 \cdot 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; 5) ионосферный потенциал 250 кВ.

В результате натурных наблюдений и численного моделирования установлено, что развитие конвекции в АПС приводит к уменьшению полярных (вклад одноименно заряженных ионов) и полной электрической проводимости вблизи поверхности земли (рис. 3, 4). Связанное с конвекцией усиление генерации турбулентности, сопровождающееся увеличением турбулентной кинетической энергии и дисперсии флуктуаций вертикальной скорости, способствует более интенсивному вертикальному перемешиванию ионизирующих субстанций из приземного слоя и приводит к более однородному высотному распределению электрической проводимости. Радиационное выхолаживание подстилающей поверхности и формирование ночного устойчивого АПС способствует увеличению проводимости приземного слоя за счет аккумуляции радона и радиоактивных продуктов распада. При этом разность положительной и отрицательной полярных проводимостей, которая определяет объемный электрический заряд легких атмосферных ионов, остается положительной. В остаточном слое, расположенном над устойчивым АПС, электрическая проводимость не претерпевает существенных изменений, что приводит к формированию высотного профиля, имеющего минимум, расположенный внутри остаточного слоя.

Вариабельность аэроэлектрического поля. Эволюция высотных профилей и вариабельность напряженности аэроэлектрического поля, связанная с вертикальным транспортом радона, в невозмущенном осадками и грозовой активностью АПС и нижней свободной атмосфере над сушей средних широт была исследована с использованием стохастической электродинамической модели и результатов натурных наблюдений. Как отмечалось в предыдущем разделе, в ночных условиях (в отсутствие тумана) электрическая проводимость имеет минимальное значение над устойчиво стратифицированным АПС,

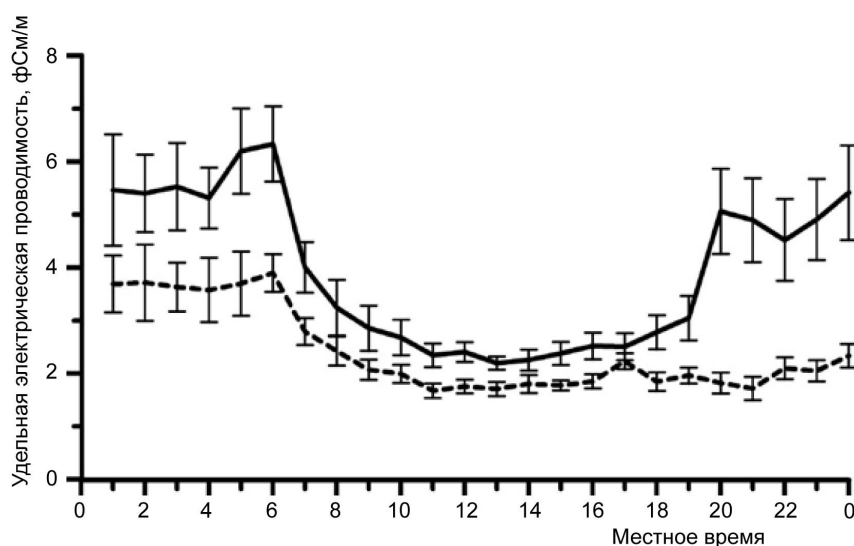


Рис. 3. Суточный ход положительной (сплошная) и отрицательной (пунктир) удельных электрических проводимостей воздуха на высоте 1 м над поверхностью земли.

По результатам наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН за 16, 18—24 мая и 03, 04, 12 июня 2014 г.
Скользящее усреднение с интервалом в 1 ч.

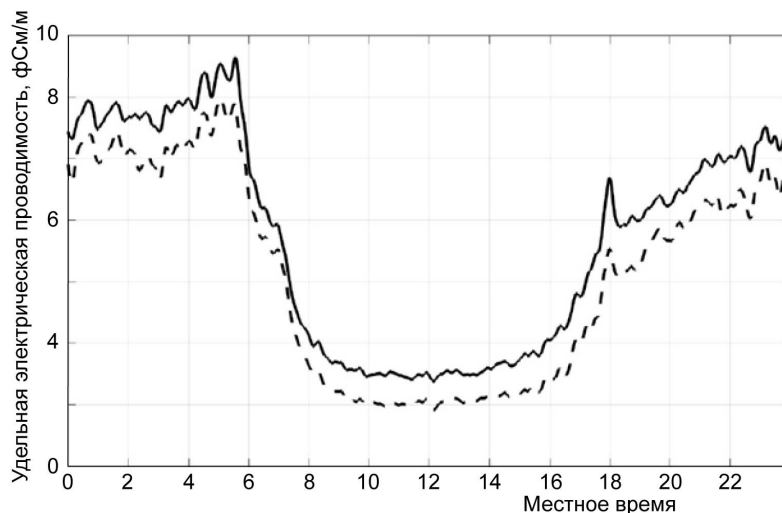


Рис. 4. Суточный ход положительной (сплошная) и отрицательной (пунктир) удельных электрических проводимостей воздуха на высоте 1 м над поверхностью земли, рассчитанный в результате моделирования. Скользящее усреднение с интервалом в 10 мин.

в слое, оставшемся от предыдущего конвективного АПС. Оценки изменений напряженности электрического поля, вызванного разделением зарядов на неоднородностях электрической проводимости, выполненные в [29], показали, что под областями пониженной проводимости напряженность электрического поля уменьшается, а внутри таких областей увеличивается за счет дополнительного поля, создаваемого образовавшимся электрическим диполем.

Вертикальный вынос радона и продуктов его радиоактивного распада приводит к уменьшению проводимости в нижней части АПС. Кроме транспорта радиоактивных элементов конвективное перемешивание положительного заряда, образующегося вблизи проводящей земной поверхности вследствие электродного эффекта, приводит к его аккумуляции в АПС и росту напряженности поля (рис. 5, см. вклейку). Таким образом через механизм турбулентного переноса радиоактивных и электрически заряженных компонент воздуха величина дисперсии флуктуаций вертикальной скорости переноса субстанций оказывается связанной с величиной напряженности аэроэлектрического поля. На рис. 6 представлены результаты натурных наблюдений и численного моделирования вариабельности напряженности электрического поля. Вариабельность оценивалась относительно максимального за сутки значения напряженности электрического поля. Приведенные кривые иллюстрируют механизм генерации вариаций аэроэлектрического поля, обусловленный турбулентным транспортом радона и объемного заряда. В соответствии с результатами [29], дисперсия короткопериодных флуктуаций поля также определяется переносом неоднородностей объемного заряда, и может характеризовать турбулентный режим АПС [30]. Рассчитанные согласно модели средний за сутки высотный профиль и диапазон вариабельности напряженности поля, связанный с условиями стратификации АПС, приведены на рис. 7.

Вариабельность электрической проводимости и напряженности аэроэлектрического поля в АПС, не связанная с глобальными факторами и определяемая совместным действием следующих процессов: эмиссия радона, ионизация, разделение зарядов на неоднородностях проводимости, включая электродный эффект, и турбулентный транспорт субстанций, оказывается значительной в сравнении с глобальной составляющей аэроэлектрических вариаций. Интенсивность вертикального перемешивания, определяемая условиями температурной стратификации, источниками генерации и статистическими свойствами турбулентности, влияет на динамику атмосферных электрических величин и формирование их высотных профилей в АПС и свободной атмосфере. Поэтому аэроэлектрические наблюдения наряду со стандартными метеорологическими могут дать полезные и оперативные параметры состояния среды. Однако для более подробного и реалистичного воспроизведения вариабельности электрического состояния нижней атмосферы необходимо учитывать вариабельность скорости эмиссии радона, связанную как со свойствами грунта, так и взаимодействием верхнего слоя почвенного воздуха

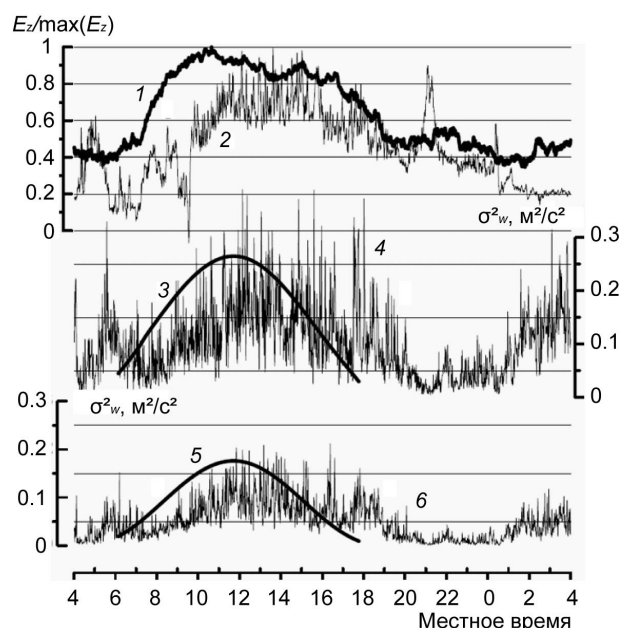


Рис. 6. Вариабельность среднeminутных значений напряженности электрического поля по результатам расчета (1) и наблюдений 27 июля 2014 г. (2); временная зависимость параметризованных высотных профилей дисперсии вертикальной скорости на высоте 10 м (3) и 2 м (5); вариабельность дисперсии вертикальной скорости ветра на высоте 10 м (4), 2 м (6) по результатам наблюдений 27 июля 2014 г.

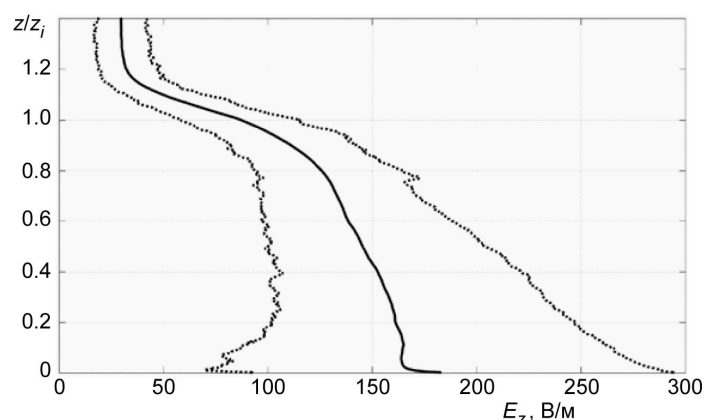


Рис. 7. Среднесуточный высотный профиль (сплошная линия) и диапазон вариабельности (пунктирные кривые показывают минимальные и максимальные суточные значения) напряженности электрического поля в АПС и нижней свободной атмосфере по результатам моделирования; z_i — максимальная высота конвективного АПС.

с атмосферным. Кроме этого, не следует игнорировать неоднородную распространенность предшественника радона — ^{226}Ra в породах, составляющих верхние несколько метров земной поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ № 16-17-10209 и частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-04960.

Литература

1. Garratt J. R. The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 316 p.
2. Stull R. B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 670 p.
3. Анисимов С. В., Шихова Н. М. Вариабельность электрического поля невозмущенной атмосферы средних широт // Геофизические исследования. 2008. № 3. С. 25—38.
4. Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Шихова Н. М. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11—12. С. 787—802.
5. Zhang K., Feichter J., Kazil J., Wan H., Zhuo W., Griffiths A. D., Sartorius H., Zahorowski W., Ramonet M., Schmidt M., Yver C., Neubert R. E. M., Brunke E.-G. Radon activity in the lower troposphere and its impact on ionization rate: a global estimate using different radon emissions // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 7817—7838.

6. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 4. С. 1—9. DOI: 10.7868/S0002351514040026.
7. Anisimov S. V., Mareev E. A., Shikhova N. M., Dmitriev E. M. Universal spectra of electric field pulsations in the atmosphere // Geophys. Res. Letters. 2002. V. 29, N. 24, 2217, doi:10.1029/2002GL015765.
8. Willett J. C. Fair weather electric charge transfer by convection in an unstable planetary boundary layer // J. Geoph. Res. 1979. V. 84. P. 703—718.
9. Hoppel W. A., Anderson R. V., Willett J. C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer // The Earth's electrical environment. Krider, E.P. and Roble, R.G., Eds. Washington: Natl. Acad. Press, 1986. P. 149—165.
10. Anderson B., Markson R., Fairall C. W., Willett J. C. Aircraft investigation of the turbulent transport of electric charge through the unstable planetary boundary layer // Final Technical Report submitted to the Air Force Office of Scientific Research. 1989. 321 p.
11. Marshall T. C., Rust W. D., Stolzenburg M., Roeder W. P., Krehbiel P. R. A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 24455—24469.
12. Анисимов С. В., Мареев Е. А., Шихова Н. М. Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей нижней атмосферы // Радиофизика. 2006. Т. 49, № 1. С. 35—52.
13. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 1—16. DOI: 107868/S000233717010033.
14. Stohl A., Thomson D. J. A density correction for Lagrangian particle dispersion models // Boundary-Layer Meteorol. 1999. V. 90. P. 155—167.
15. Cassiani M., Stohl A., Brioude J. Lagrangian stochastic modelling of dispersion in the convective boundary layer with skewed turbulence conditions and a vertical density gradient: Formulation and implementation in the FLEXPART model // Boundary-Layer Meteorol. 2015. V. 154. P. 367—390. DOI 10.1007/s10546-014-9976-5.
16. Lin J. C., Gerbig C. How can we satisfy the well-mixed criterion in highly inhomogeneous flows? A practical approach. Lagrangian Modeling of the Atmosphere / Eds. Lin J., Brunner D., Gerbig C., Stohl A., Luhar A., Webley P. AGU. Geopress, 2012. P. 59—69.
17. Liu S. C., McAfee J. R., Cicerone R. J. Radon 222 and tropospheric vertical transport // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 7291—7297.
18. Jacob D. J., Prather M. J. Radon-222 as a test of convective transport in a general circulation model // Tellus. 1990. 42B. P. 118—134.
19. Williams A. G., Zahorowski W., Chambers S., Griffiths A., Hacker J. M., Element A., Werczynsky S. The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 155—174.
20. Chambers S., Williams A. G., Crawford J., Griffiths A. D. On the use of radon for qualifying the effects of atmospheric stability on urban emissions // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 1175—1190.
21. Vargas A., Arnold D., Adame J. A., Grossi C., Hernández-Ceballos M. A., Bolívar J. P. Analysis of the vertical radon structure at the Spanish «El Arenosillo» tower station // J. Environ. Radioactivity. 2015. V. 139. P. 1—17.
22. Vinuesa J.-F., Galmarini S. Characterization of the 222Rn family turbulent transport in the convective atmospheric boundary layer // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 697—712.
23. Vinuesa J.-F., Basu S., Galmarini S. The diurnal evolution of 222Rn and its progeny in the atmospheric boundary layer during the WANGARA experiment // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 5003—5019.
24. Degrazia G. A., Anfossi D., Carvalho J. C., Mangia C., Tirabassi T., Campos Velho H. F. Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. P. 3575—3583.
25. Jacoby-Koaly S., Campistron B., Bernard S., Bénech B., Arduin-Girard F., Dessens J., Dupont E., Carissimo B. Turbulent dissipation rate in the boundary layer via UHF wind profiler Doppler spectral width measurements // Boundary-Layer Meteorol. 2002. V. 103. P. 361—389.
26. Balsley B. B., Frehlich R. G., Jensen M. L., Meillier Y. High-resolution in situ profiling through the stable boundary layer: examination of the SBL top in terms of minimum shear, maximum stratification, and turbulence decrease // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. P. 1291—1307.
27. Tjernström M., Balsley B. B., Svensson G., Nappo C. J. The effects of critical layers on residual layer turbulence // J. Atmos. Sci. 2009. V. 66. P. 468—480.
28. Rakesh P. T., Venkatesan R., Srinivas C. V. Formulation of TKE based empirical diffusivity relations from turbulence measurements and incorporation in a Lagrangian particle dispersion model // Envir. Fluid Mech. 2013. V. 13. P. 353—369.
29. Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M. Space charge and aeroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // Atm. Res. 2014. V. 135—136. P. 244—254.
30. Анисимов С. В., Шихова Н. М. Фрактальные свойства аэроэлектрических пульсаций // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 28—45.

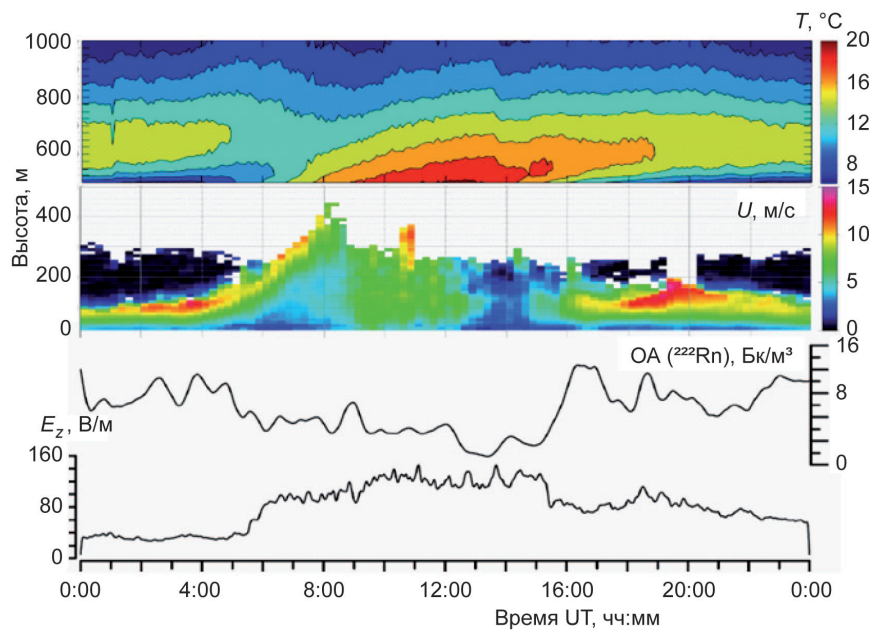


Рис. 1. Регистрограммы вариаций температуры воздуха (T) по данным температурного профилера МТП-5, вариаций скорости горизонтального ветра (U) по данным акустического профайлера Scintec MFAS, объемной активности радона ^{222}Rn по данным прибора Alpha Guard PQ2000 и вертикальной компоненты аэроэлектрического поля (E_z) по данным электростатического флюксметра.

Результаты наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН за 20.09.2014 г. Скользящее усреднение с интервалом в 10 мин.

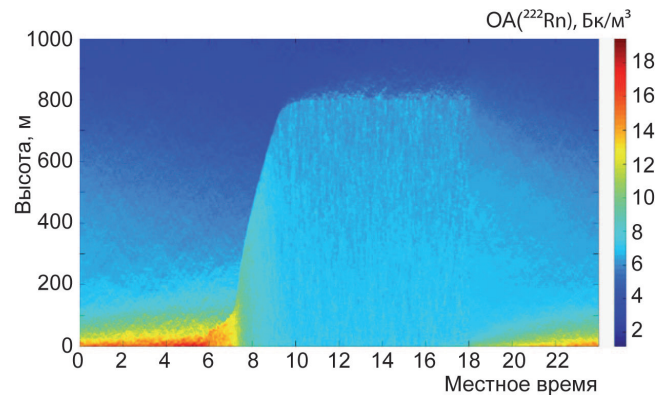


Рис. 2. Суточный ход объемной активности радона ^{222}Rn , рассчитанный в результате моделирования. Скользящее усреднение с интервалом в 10 мин.

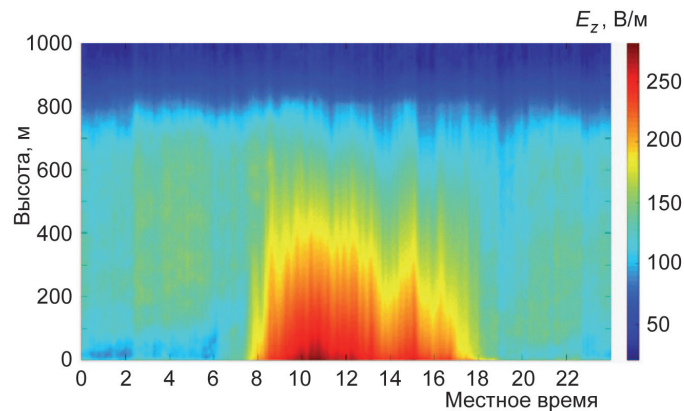


Рис. 5. Эволюция напряженности электрического поля в АПС по результатам моделирования. Скользящее усреднение с интервалом в 10 мин.