

*На правах рукописи*



**Березина Елена Викторовна**

**ПРИЗЕМНЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОТОКИ РАДОНА-222  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ, И ОЦЕНКИ БИОГЕННЫХ  
ЭМИССИЙ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, МЕТАНА И СУХОГО  
ОСАЖДЕНИЯ ОЗОНА**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Еланский Николай Филиппович** - заведующий отделом исследований состава атмосферы, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Ермаков Александр Николаевич** - доктор химических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН.

**Обвинцева Людмила Алексеевна** - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории химической кинетики научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я.Карпова.

**Ведущая организация:**

Научно-производственное объединение "Тайфун" (НПО "Тайфун").

Защита состоится 16 октября 2014 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и на сайте [www.ifaran.ru](http://www.ifaran.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.096.01

кандидат географических наук

Л.Д. Краснокутская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Радиоактивный газ радон-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) является одним из членов ряда радиоактивного распада урана-238 ( $^{238}\text{U}$ ), рассеянного практически повсеместно в земной коре. Основным источником  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере является почва, и его поток из почвы зависит от свойств и состояния почвы. На  $^{222}\text{Rn}$  приходится примерно 50–55% дозы облучения, которую ежегодно получает каждый житель Земли. Из-за значительного влияния  $^{222}\text{Rn}$  и его дочерних продуктов распада на здоровье человека мониторинг их содержания в приземном воздухе проводится во многих странах мира.

Преобладающий сток  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере – радиоактивный распад.  $^{222}\text{Rn}$  химически инертен, а время его жизни в атмосфере ( $T_{1/2} \approx 3,8$  дней) сравнимо со временем жизни многих атмосферных составляющих и, во многих случаях, с временными масштабами атмосферной динамики. Это делает  $^{222}\text{Rn}$  удобным трассером для исследования различных атмосферных процессов, в частности, для определения области формирования и траектории движения воздушных масс, исследования перемешивания в приземном слое, валидации оценок атмосферного транспорта в климатических моделях, исследования атмосферного электричества, а также для оценки эмиссий климатически активных газов.

Решение всех вышеперечисленных задач требует надёжных данных о пространственных и временных вариациях потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу. Данных о потоках  $^{222}\text{Rn}$  над территорией России очень мало, они крайне разрозненны, и получение таких данных в масштабах обширного континента с различными геологическими и климатическими особенностями является актуальным.

За рубежом данные о концентрациях и потоках  $^{222}\text{Rn}$  часто используют для оценки потоков парниковых газов, в частности,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  (radon-calibrated flux technique, далее - радоновый метод). Сложность оценки потоков этих

климатически активных газов связана с неопределённостью в распределении их источников и стоков в атмосфере. Радоновый метод заключается в сравнении одновременно измеряемых концентраций двух газов: газа-трассера ( $^{222}\text{Rn}$ ) с известными источниками и стоками, и газа, поток которого требуется определить. Радоновый метод позволяет выделить вклад локальных эмиссий и стоков газов на границе земная поверхность-атмосфера на фоне адвективного переноса и получить потоки парниковых газов на обширных континентальных территориях, с различными климатическими и ландшафтными особенностями. Учитывая тот факт, что информация о потоках парниковых газов на территории России имеет локальный и эпизодический характер, что сильно затрудняет регионализацию получаемых на её основе оценок и определение их пространственных и временных вариаций, использование радонового метода для оценки парниковых газов над обширной континентальной территорией России представляется очень важным.

**Целью данной работы** является анализ пространственно - временной изменчивости приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , определение его потоков из почвы в атмосферу и последующая количественная оценка биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  для различных регионов России в разные сезоны по данным измерений в экспедициях TROICA (TRanscontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere) в 1999–2008 гг.

#### **Основные задачи исследования:**

1. Анализ пространственных и временных вариаций концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое атмосферы по данным измерений с передвижной лаборатории вдоль Транссибирской магистрали (Москва – Владивосток – Москва).

2. Определение потоков  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу для различных регионов России по данным измерений его приземной концентрации и температурной стратификации пограничного слоя атмосферы.

3. Количественные оценки биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого

осаждения  $O_3$  для различных регионов России в различные сезоны с использованием радонового метода.

#### **Методы исследования.**

Для измерения концентрации примесей в приземном воздухе и метеорологических параметров использовались приборы, удовлетворяющие требованиям Глобальной службы атмосферы (GAW WMO). Калибровка газоанализаторов проводилась регулярно с использованием эталонных смесей Института химии Макса Планка (Германия) и ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (Россия).

Анализ данных одновременных измерений приземных концентраций  $^{222}Rn$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_3$ , вертикальных профилей температуры и других данных, необходимых для решения поставленных задач (приземные концентрации  $CO$  и  $NO$ , метеорологические характеристики, дневниковые записи условий наблюдений) проводился с помощью программного обеспечения Microsoft Excel, Visual Basic, C#, Origin Pro, Statistica, Arc View.

Поток  $^{222}Rn$  рассчитывался с помощью специально разработанной математической модели, основанной на уравнении диффузии.

#### **Научная новизна работы.**

- Впервые проанализированы и систематизированы данные измерений приземной концентрации  $^{222}Rn$  над обширными континентальными районами России вдоль Транссибирской магистрали от Москвы до Владивостока.
- Выявлены локальные и мезомасштабные особенности пространственного распределения концентрации  $^{222}Rn$ , ее сезонные и суточные изменения.
- Предложен метод расчёта потока  $^{222}Rn$  из почвы в атмосферу, основанный на накоплении  $^{222}Rn$  в толще пограничного слоя атмосферы в условиях приземной инверсии температуры по данным измерений на передвижной лаборатории.
- Впервые представлены потоки  $^{222}Rn$  из почвы в атмосферу для обширной

континентальной территории России с различными геологическими и климатическими особенностями и для разных сезонов.

- Впервые получены количественные оценки биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  для континентальных районов России с различными ландшафтными и климатическими условиями в разные сезоны наблюдений.

### **Научная и практическая значимость.**

Выполнены исследования детальной структуры распределения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  и его потоков из почвы на обширной территории. Изучены механизмы ее временной изменчивости и связи с температурной стратификацией пограничного слоя атмосферы.

Показана возможность применения радонового метода для оценки потоков климатически активных газов на основе данных непрерывных одновременных измерений, полученных в экспедициях на передвижной лаборатории. Это позволило впервые выполнить количественные оценки  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем, а также сухого осаждения  $\text{O}_3$  для континентальных регионов России с различными ландшафтными и климатическими условиями в различные сезоны.

Представленные данные о концентрациях и потоках  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу могут быть использованы для решения различных задач в области физики и химии атмосферы, экологии, геологии и здравоохранения. Полученные значения потоков  $^{222}\text{Rn}$ , парниковых газов и стока  $\text{O}_3$  могут быть полезны для верификации региональных и глобальных климатических моделей, а также для валидации параметров атмосферного переноса в транспортно-химических моделях. Результаты работы в значительной мере восполняют дефицит информации о пространственных и сезонных вариациях потоков парниковых газов в континентальном масштабе.

### **Защищаемые положения.**

1. Характеристики пространственной и временной изменчивости

приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  вдоль Транссибирской магистрали от Москвы до Владивостока, полученные по данным измерений в экспедициях TROICA в 1999 - 2008 гг.

2. Метод определения потоков  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу, основанный на накоплении  $^{222}\text{Rn}$  в толще пограничного слоя атмосферы в условиях приземной инверсии температуры.

3. Значения потоков  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу для различных регионов России в различные сезоны.

4. Количественные оценки биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  для обширных континентальных районов России с различными ландшафтными и климатическими условиями в различные сезоны, полученные с использованием радонового метода.

#### **Личный вклад автора.**

Автор принимал активное участие в анализе и интерпретации данных наблюдений, полученных в экспедициях TROICA, в разработке метода оценки потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу, постановке и проведении численных экспериментов, интерпретации полученных результатов. Расчёт потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу, а также биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  проводился непосредственно автором.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались автором на Всероссийской школе - конференции молодых ученых: "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты" (Нижний Новгород, 2007, 2010 гг.; Борок, 2008 г.; Звенигород, 2009 г.); на Всероссийской конференции "Развитие системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА)" (Москва, 2007 г.); на 2-м международном симпозиуме ACCENT "Изменение состава атмосферы" (Урбино, Италия, 2007 г.); на международной конференции по радиоэкологии и радиоактивности окружающей среды (Берген, Норвегия, 2008 г.); на

Генеральной Ассамблее Европейского геофизического общества (European Geophysical Union, EGU, Вена, Австрия, 2009 г.); на научной международной конференции РЕТrА “Загрязнение окружающей среды – очистка воздуха” (Прага, Чехия, 2011 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, из которых 5 вышли в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Рукопись содержит 136 страниц, 10 рисунков и 11 таблиц, список литературы из 146 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, сформулированы цель и задачи, перечислены основные результаты работы, их новизна и значимость, личный вклад автора, представлены положения, выносимые на защиту и описана структура диссертации.

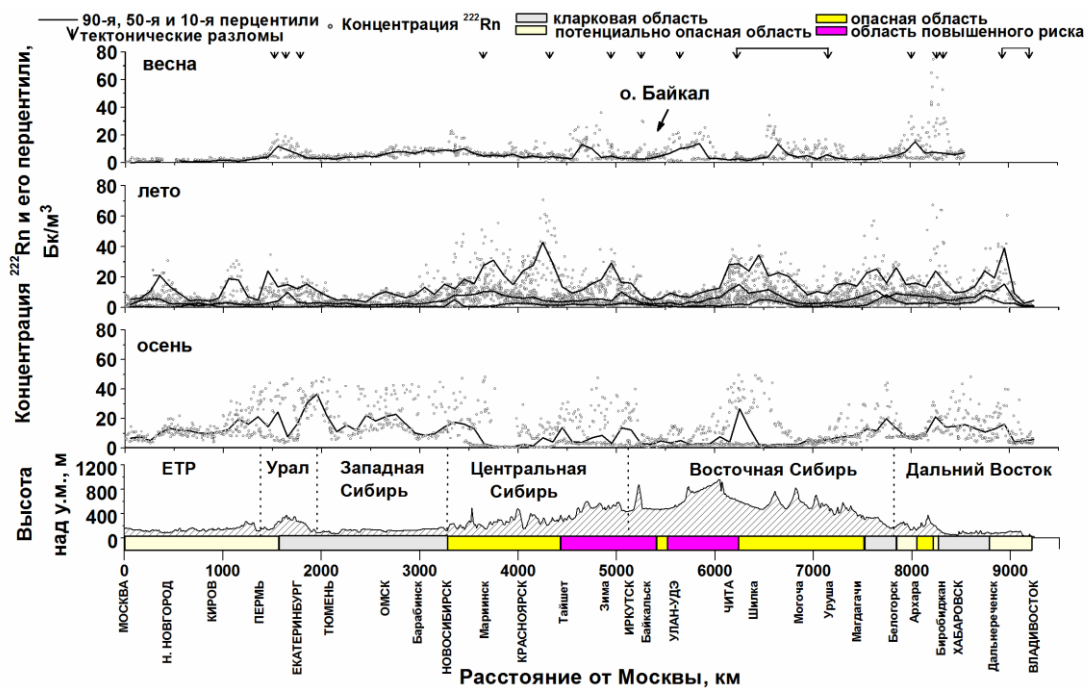
**В главе 1** приводится литературный обзор основных свойств  $^{222}\text{Rn}$ , его источников и стоков в атмосфере, методов измерения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в атмосферном воздухе, пространственных и временных вариациях  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое атмосферы. **В разделе 1.2** подробно описаны механизмы образования, распределения и миграции  $^{222}\text{Rn}$  в почве, являющейся основным источником  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере, и факторы, влияющие на эти процессы. Представлена информация о содержании  $^{222}\text{Rn}$  в природных водах и его антропогенных источниках в атмосфере. Дана характеристика основных факторов, влияющих на поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу: геологических особенностей территории, свойств и состояния приповерхностного слоя почвы, метеорологических факторов (изменения температуры, атмосферного давления, количества осадков). Приведены данные о концентрациях и потоках  $^{222}\text{Rn}$  в



различных регионах мира. Описаны факторы, влияющие на вертикальное распределение  $^{222}\text{Rn}$  в атмосфере. **В разделе 1.2** приведены методы измерения приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , подробно описан метод фильтрации, используемый при измерении приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в экспедициях TROICA. **В разделе 1.3** приводится анализ литературы о пространственных и временных вариациях  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое и факторах, обуславливающих эти вариации. Отмечено, что суточный ход приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  обусловлен, прежде всего, суточной изменчивостью вертикальной устойчивости атмосферы. Устойчивая атмосферная стратификация (приземные инверсии температуры) способствует накоплению  $^{222}\text{Rn}$  в приземном воздухе и росту его приземной концентрации. Сезонная изменчивость приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  определяется изменчивостью метеорологических параметров атмосферы (температурной стратификацией атмосферы, атмосферными осадками) и состоянием почвы (температурой, промерзанием и оттаиванием). **В разделе 1.4** сформулированы выводы к главе 1.

**В главе 2** анализируются данные измерений приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в экспедициях TROICA, выполненных на передвижной лаборатории вдоль Транссибирской магистрали по маршруту Москва-Владивосток-Москва в различные сезоны 1999 - 2008 гг. **В разделе 2.1** представлена информация об экспедициях TROICA, описаны маршруты и периоды измерений, а также приборы, которые использовались для измерения приземных концентраций исследуемых газов, метеорологических и других параметров, необходимых для решения поставленных в работе задач. **В разделе 2.2** анализируются пространственные вариации приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  по данным экспедиций TROICA вдоль Транссибирской магистрали по маршруту Москва-Владивосток-Москва в 1999-2008 гг. (рис.1). Существенные вариации приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  вдоль Транссибирской магистрали обусловлены суточной изменчивостью атмосферной устойчивости. Наиболее высокие

концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое (до  $75 \text{ Бк/м}^3$ ) в экспедициях TROICA обычно наблюдались ночью во время продолжительных и устойчивых инверсий температуры в горных регионах России, Центральной и Восточной Сибири, и на Дальнем Востоке. Полученные в экспедициях TROICA данные хорошо согласуются с данными карты радоноопасности России [1].



**Рис. 1.** Пространственное распределение средних 10-ти минутных значений приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  и высоты над у.м. от Москвы до Владивостока по данным экспедиций TROICA. Закрашенные прямоугольники - области радонового риска по данным карты радоноопасности России [1].

**В разделе 2.3.** исследуется временная изменчивость приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$ . Наибольшие средние суточные значения концентрации  $^{222}\text{Rn}$  и их вариации над территорией России отмечены осенью ( $12,6 \pm 10,9 \text{ Бк/м}^3$ ) вследствие наиболее мощных (градиент температуры –  $2,5 \pm 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и продолжительных ( $6 \pm 5 \text{ ч}$ ) инверсий температуры, а наименьшие ( $6,7 \pm 6,7 \text{ Бк/м}^3$ ) - весной, когда наличие на поверхности снежного покрова препятствует потоку  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу. Наиболее высокие средние дневные концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , главным образом отражающие влияние геологических особенностей

исследуемой территории и регионального атмосферного переноса  $^{222}\text{Rn}$ , получены на Дальнем Востоке ( $7,0 \pm 1,7$  и  $7,3 \pm 5,8$  Бк/м<sup>3</sup> весной и летом, соответственно) и в Центральной Сибири ( $5,9 \pm 4,3$  и  $6,8 \pm 5,2$  Бк/м<sup>3</sup> весной и летом, соответственно). Нетипично высокие концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , отмечавшиеся осенью 2005 г. (TROICA-9) на ЕТР (Европейской территории России) и в Западной Сибири ( $13,3 \pm 6,4$  и  $17,9 \pm 10,6$ , соответственно), обусловлены влиянием устойчивого антициклона с продолжительными (до 16 часов) инверсиями температуры, а также возможным влиянием локальных антропогенных источников  $^{222}\text{Rn}$ . В целом, осенью концентрация  $^{222}\text{Rn}$  выше, чем летом и весной для всех регионов России во все сезоны наблюдений.

Отмечен существенный рост приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  ( $\approx$  в 3 раза) с ростом глубины сезонного протаивания почвы с лета 1999 г. по осень 2005 г. в зоне вечной мерзлоты в регионе Восточной Сибири за счёт интенсивной миграции  $^{222}\text{Rn}$ , накопившегося в замёрзших грунтах, в приповерхностный слой почвы и его последующей эксхалации в атмосферу. В разделе 2.4 сформулированы выводы к главе 2.

В главе 3 рассчитывается поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу над различными регионами России по данным прямых измерений на передвижной лаборатории в экспедициях TROICA. В разделе 3.1 описывается предложенный автором метод оценки потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу, основанного на накоплении  $^{222}\text{Rn}$  в толще пограничного слоя атмосферы в условиях приземной инверсии температуры. Для расчётов использовалась математическая модель, основанная на нестационарном уравнении диффузии с переменным по высоте коэффициентом турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(z) \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \lambda c, \quad z_0 < z < H, \quad (1)$$

где  $c$  [Бк/м<sup>3</sup>] - концентрация  $^{222}\text{Rn}$ ,  $K$  [м<sup>2</sup>/с] – зависимый от высоты коэффициент турбулентной диффузии,  $\lambda$  ( $\approx 2.08 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) – константа распада

$^{222}\text{Rn}$ ,  $z_0$  ( $\approx 4$  м над у.з.) – не зависящая от времени высота измерений на которой  $c_0 \equiv c(z_0, t \geq t_1)$  – заданная функция по измеренным концентрациям  $^{222}\text{Rn}$ . Соответствующие начальные и граничные условия для (1):

$$c(z, t_1) = c_0(t_1), \quad (z_0 \leq z \leq H) \quad (2)$$

$$c(z_0, t) = c_0(t), \quad \left( \frac{\partial c}{\partial z} \right)_{z=H} = 0. \quad (t_1 < t < t_2) \quad (3)$$

Расчёты проводились для ночных эпизодов с приземными инверсиями температуры (далее-ночные эпизоды) при следующих предположениях:

1. Во время каждого ночного эпизода поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы является постоянным во времени и пространстве;

2. В момент времени  $t_1$  приземная концентрация  $^{222}\text{Rn}$  равна измеренному значению до момента формирования инверсии температуры и равномерно распределена в вертикальном столбе атмосферы вследствие активного дневного перемешивания;

3. Вертикальный транспорт  $^{222}\text{Rn}$  ограничен высотой верхней границы инверсии;

4. Любые локальные изменения приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  в подынверсионном слое вследствие адвекции воздуха пренебрежимо малы по сравнению с его вертикальным транспортом за счёт турбулентной диффузии, и основным источником  $^{222}\text{Rn}$  в подынверсионном слое является его поток из почвы.

Для решения уравнений (1-3) была использована неявная разностная схема второго порядка на одномерной сетке с шагом по высоте = 1 м и по времени = 6 сек для соответствующих профилей  $K(z)$ .

Согласно [2] линейная зависимость  $K$  от  $z$  в приземном слое ниже 100 метров (при независимом от высоты  $K$  выше 100 м) задаётся следующим образом:

$$K(z) = K(z_1) \cdot z/z_1, \quad (z < H) \quad (4)$$

где  $K(z_1)$ - известный коэффициент турбулентной диффузии на высоте  $z_1$ . Значение  $H$  принимается постоянным и выбрано по данным нескольких экспедиций (~ 600 м) таким образом, чтобы исходный результат оценки потока  $^{222}\text{Rn}$  был сравним с известными континентальными значениями, представленными в литературе. Профили  $K$  задавались согласно [3], [4] и возможному диапазону  $K(z_1)$  для тёплого периода измерений вдоль маршрута TROICA, полученному на основе модельных значений  $K$  на высотах 50 – 100 м над у.з. по данным NOAA ARL Archived Meteorology (<http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>).

Так как выбор значений  $K(z)$  существенно влияет на результаты оценки потока  $^{222}\text{Rn}$ , расчёт проводился для 2-х профилей  $K(z)$ , характеризующих 2 класса устойчивости атмосферы:  $\Delta T_{100} > 4.0^\circ\text{C}$  – очень устойчивая (G) и  $\Delta T_{100} = 1.5-4.0^\circ\text{C}$  - среднеустойчивая (F) в соответствии с [5], где  $\Delta T_{100}$  – изменение температуры в приземном 100-метровом слое. Выбранные классы G и F полностью характеризуют диапазон значений  $\Delta T_{100}$ , наблюдавшихся в экспедициях TROICA во время приземных инверсий температуры. Профили  $K$  задавались следующим образом:

$$K(z_1) = \begin{cases} 10 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ for class G,} \\ 100 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ for class F.} \end{cases} \quad z_1 = 1 \text{ m}, \quad (5)$$

Общее содержание  $^{222}\text{Rn}$ ,  $M$ , в вертикальном столбе атмосферы в момент времени  $t_i$  в слое  $0 \leq z \leq H$  и скорость накопления  $Q$  (поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу) для конкретного ночного эпизода рассчитывались по следующим уравнениям:

$$M(t_i) = \int_0^H c(t, z) dz = \sum_j c(z_j, t_i) \cdot \Delta z, \quad (6)$$

$$Q = \overline{(dM / dt)}^t \approx (M_{t=t_2} - M_{t=t_1}) / (t_2 - t_1), \quad (7)$$

В результате получено 2 значения потока  $^{222}\text{Rn}$ ,  $Q_G$  и  $Q_F$  для классов устойчивости G и F, соответственно. Средний поток  $^{222}\text{Rn}$  для каждого эпизода,  $\bar{Q}_i$ , и погрешность оценки,  $\sigma_{Q,i}$ , (рис.2) определялись следующим образом:

$$\bar{Q}_i = (Q_G + Q_F)/2, \quad \sigma_{Q,i} = |Q_G - Q_F|/2 \quad (8)$$

Погрешность оценки (не является стандартным отклонением), обусловленная выбором широкого диапазона  $K(z_1)$ , составляет 20-30% и в отдельных случаях достигает 50%. Для представления полученных оценок в региональном масштабе, рассчитаны средние взвешенные значения,  $\bar{Q}_{reg}$  и  $\sigma_{Q,reg}$ , для отдельных регионов России:

$$\bar{Q}_{reg} = \sum_i g_i \cdot \bar{Q}_i / \sum_i g_i, \quad (9)$$

и

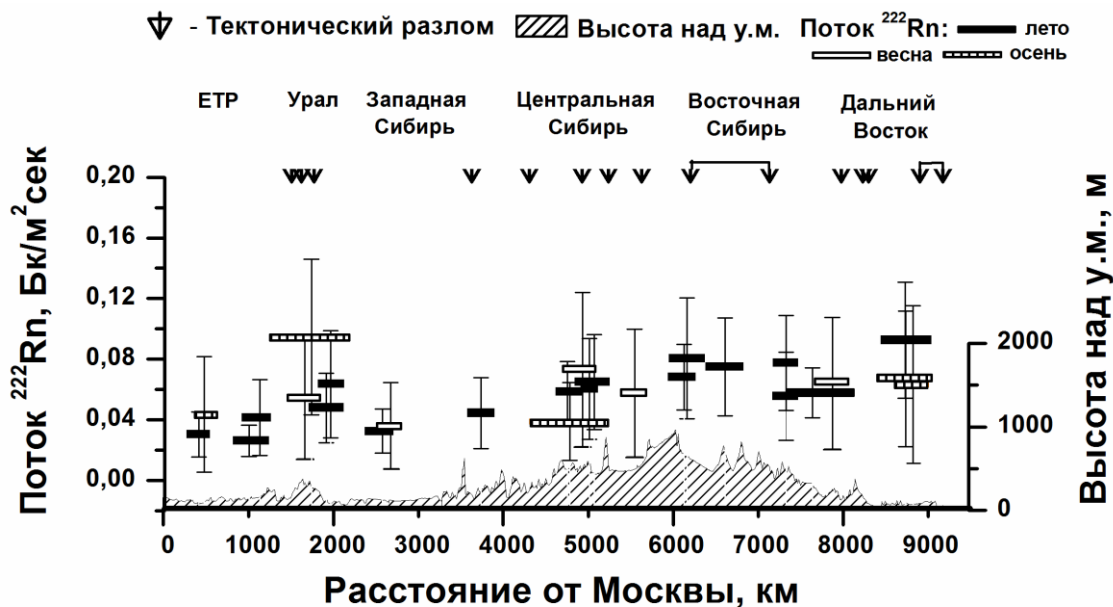
$$\sigma_{Q,reg} = \left( \sum_i g_i \right)^{-2}, \quad (10)$$

соответственно, где  $g_i = \sigma_{Q,i}^{-1}$ , а суммирование по  $i$  проводилось для каждого ночного эпизода, наблюдавшегося в экспедиции TROICA в пределах отдельного региона.

**В разделе 3.2** проводится анализ полученных потоков  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу. Отмечены значительные вариации потока  $^{222}\text{Rn}$  над территорией России, от  $29 \pm 8$  мБк  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$  до  $95 \pm 51$  мБк  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ , в зависимости от геологических особенностей исследуемых регионов, а также времени года (рис. 2). Наиболее высокие значения потока  $^{222}\text{Rn}$  получены в горных регионах Центральной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке. Высокие значения потока  $^{222}\text{Rn}$ , полученные осенью 2005 г. на ЕТР, Урале и в Западной Сибири, а также весной в Центральной и Восточной Сибири, обусловлены влиянием локальных факторов: крупных тектонических разломов и антропогенных источников  $^{222}\text{Rn}$ .

Полученные оценки потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу согласуются с известными данными прямых измерений потока  $^{222}\text{Rn}$  в различных регионах России и в 3-7 раз превышают модельные оценки, представленные в литературе. В разделе 3.3 представлены выводы к главе 3.

В главе 4 проводится расчёт биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  над обширными континентальными регионами России по данным измерений в экспедициях TROICA с помощью радонового метода. Под биогенными эмиссиями  $\text{CO}_2$  понимается его выделение из почвы в атмосферу в процессе жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и животных, наземных частей растений и корневой системы, а также при разложении органического вещества микроорганизмами и в результате химических реакций неорганических веществ. Биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$  в основном связаны с выделением  $\text{CH}_4$  из увлажненных почв (болот, тундры, зоны вечной мерзлоты), где он образуется при разложении органического вещества анаэробными микроорганизмами.



**Рис. 2.** Рассчитанные потоки  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу от Москвы до Владивостока. Длина каждого прямоугольника соответствует продолжительности ночного эпизода (в км), для которого рассчитывался поток  $^{222}\text{Rn}$ . Объединённые стрелки – мощные разломы вдоль маршрута экспедиций.

**В разделе 4.1** приводится описание радонового метода. Отмечена синхронность суточных вариаций приземных концентраций всех исследуемых газов, обусловленное накоплением  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $^{222}\text{Rn}$  и, наоборот, сухим осаждением  $\text{O}_3$  в приземном слое во время ночных приземных инверсий температуры. Из эпизодов с инверсией температуры исключались данные, полученные в условиях влияния местных и региональных антропогенных источников, а также в местах геологических разломов, во время прохождения встречных поездов, при проезде крупных городов и тоннелей, а также в дни с атмосферными осадками. Считалось, что антропогенное воздействие имеет место, если зимой концентрация  $\text{CO}$   $>0,3$  ppm, а летом  $>0,2$  ppm, а концентрация  $\text{NO}$  зимой и летом  $>0,5$  ppb [6]. Для отобранных ночных эпизодов исследовалась корреляционная зависимость между концентрацией  $^{222}\text{Rn}$  и исследуемых парниковых газов. Эпизоды с высокими коэффициентами корреляции ( $R \geq 0,7$ ) назывались ‘фоновыми’. Для каждого фонового эпизода рассчитывались биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и ночной сток  $\text{O}_3$  по известной формуле [7, 8]:

$$J(\chi) = J(^{222}\text{Rn}) \cdot \beta(\chi, ^{222}\text{Rn}), \quad (11)$$

где  $\chi$  – исследуемый газ ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ),  $J(\chi)$  [ $\text{мг м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ] – величина биогенной эмиссии ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ) или стока ( $\text{O}_3$ );  $J(^{222}\text{Rn})$  [ $\text{Бк м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ] – рассчитанный поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы,  $\beta(\chi, ^{222}\text{Rn})$  – коэффициент линейной регрессии  $\chi$  по  $^{222}\text{Rn}$ .

Скорость сухого осаждения  $\text{O}_3$ ,  $V_d$  [ $\text{см сек}^{-1}$ ], и соответствующая погрешность оценки рассчитывалась следующим образом [9,10]:

$$V_d = -\frac{J(\text{O}_3)}{\chi(\text{O}_3)}, \quad \frac{\delta V_d}{V_d} = \frac{\delta J(\text{O}_3)}{J(\text{O}_3)} + \frac{\delta \chi(\text{O}_3)}{\langle \chi(\text{O}_3) \rangle}, \quad (12)$$

где  $J(\text{O}_3)$  [ $\text{мкг м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ] – рассчитанная по (11) величина стока  $\text{O}_3$  на подстилающую поверхность;  $\delta \chi$  и  $\langle \chi(\text{O}_3) \rangle$  – уменьшение концентрации  $\text{O}_3$  в рассматриваемом эпизоде и его средняя измеренная концентрация, соответственно.

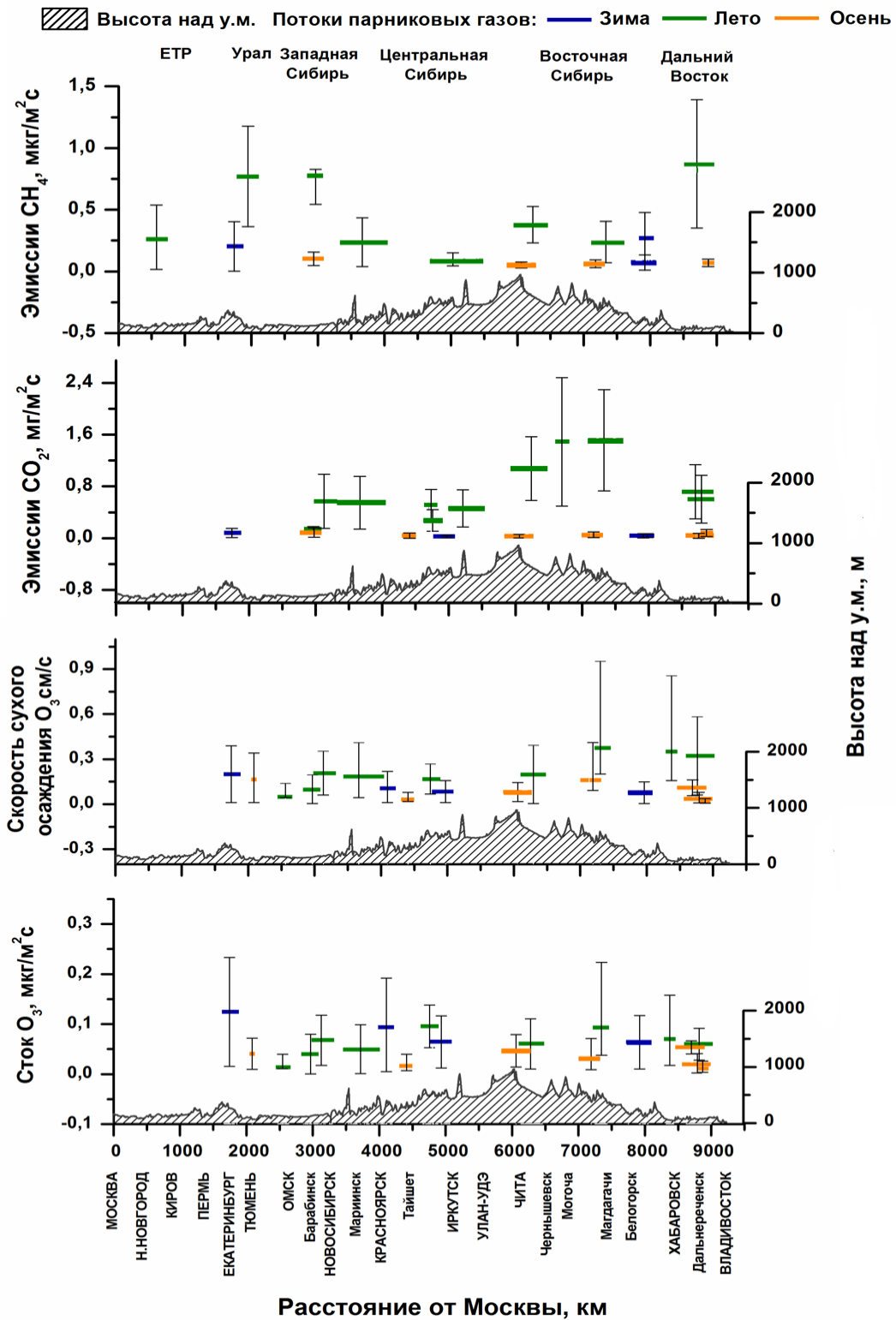


**В разделе 4.2** представлены полученные оценки потоков исследуемых парниковых газов для различных регионов России в различные сезоны измерений (рис.3). Полученные биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$  максимальны летом в Западной Сибири ( $0,77 \pm 0,60 \text{ мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) и на Дальнем Востоке ( $0,87 \pm 0,52 \text{ мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), где расположены источники  $\text{CH}_4$ : болота и увлажненные почвы, а  $\text{CO}_2$  – в Восточной Сибири ( $1,20 \pm 0,41 \text{ мг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), где расположены горные лиственничные леса (даурская лиственница). Весной и осенью эмиссии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в среднем в 4-8 раз меньше, чем летом, что, вероятно, связано с низкой температурой почвы, наличием снежного покрова и замедлением процессов дыхания растений.

Ночной сток  $\text{O}_3$  максимален весной на Урале:  $0,19 \pm 0,17 \text{ мг м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и в районе Красноярска:  $0,08 \pm 0,05 \text{ мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и летом в Центральной Сибири (участок Тайшет – Иркутск) -  $0,07 \pm 0,01 \text{ мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , а скорость его сухого осаждения максимальна летом в Восточной Сибири -  $0,33 \pm 0,21 \text{ см/с}^{-1}$  и на Дальнем Востоке -  $0,32 \pm 0,25 \text{ см/с}^{-1}$ . В целом, сухое осаждение  $\text{O}_3$  над обширной территорией России летом выше, чем весной и осенью.

Полученные оценки биогенных эмиссий  $\text{CH}_4$  и сухого осаждения  $\text{O}_3$  согласуются с опубликованными в литературе данными для ландшафтных и сезонных условий, подобных тем, что наблюдались в экспедициях TROICA (табл.1). Полученные биогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  находятся на верхней границе или на 30-40% выше значений, представленных в литературе. Для лиственничных лесов Восточного Забайкалья полученные эмиссии  $\text{CO}_2$  в среднем в 2,5 раза превышают литературные значения. Это может быть связано с тем, что полученные оценки приходятся на ночное время суток и обусловлены дыханием лесной растительности, а также с активной вырубкой леса в Восточном Забайкалье.

**В разделе 4.3** формулируются выводы к главе 4.



**Рис.3.** Биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , скорость сухого осаднения и сток  $\text{O}_3$ , рассчитанные по данным экспедиций TROICA.

**Таблица 1.** Сравнение полученных оценок с литературными данными.

Регион	Ландшафт	Поток	Источник
<b>Эмиссия CH<sub>4</sub>, мкг м<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup></b>			
Западная Сибирь	субтайга	<b>0.76±0.40</b> 1.40±1.10	данная работа <sup>1</sup> [11] <sup>2</sup>
Западная Сибирь	лесостепь	<b>0.77±0.10</b> от -0.15±0.01 до 3.70±0.24	данная работа <sup>3</sup> [12] <sup>4</sup>
<b>Эмиссия CO<sub>2</sub>, мг м<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup></b>			
Восточная Сибирь (Забайкалье)	лесостепь	<b>0.46±0.28</b> 0.19 – 0.46	данная работа <sup>5</sup> [13] <sup>6</sup>
Центральная Сибирь	лиственничный лес (даурская лиственница)	<b>0.40±0.3</b> 0.06 – 0.16	данная работа <sup>7</sup> [14] <sup>8</sup>
Центральная Сибирь	тёмнохвойные леса	<b>0.39±0.04</b> 0.002 – 0.3	данная работа <sup>9</sup> [15] <sup>10</sup>
<b>Сток O<sub>3</sub>, мкг м<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup></b>			
Западная Сибирь	мелколиственные и смешанные леса	<b>0.13±0.10</b> 0.08 – 0.27	данная работа <sup>11</sup> [16] <sup>12</sup>
<b>Скорость сухого осаждения O<sub>3</sub>, см сек<sup>-1</sup></b>			
Западная Сибирь	лугопастбищные угодья	<b>0.14±0.02</b> 0.11 – 0.13	данная работа <sup>13</sup> [10] <sup>14</sup>
Дальний Восток (Хабаровск – Владивосток)	широколиственные и смешанные леса (преобладание дуба)	<b>0.33±0.05</b> 0.10 – 0.90 0.25 – 0.82	данная работа <sup>15</sup> [9] <sup>16</sup> [17] <sup>17</sup>
Центральная Сибирь	темнохвойные леса (преобладание ели)	<b>0.17±0.10</b> 0.2 – 1.0	данная работа <sup>18</sup> [18] <sup>19</sup>

<sup>1</sup>Екатеринбург – Тюмень, 07–08.2007; <sup>2</sup>Плоские мезотрофные болота, в основном травяные и травяно-осоковые, вблизи Тюмени и лесные болота ближе к Екатеринбург (регион от Екатеринбурга до Тюмени), 07.2009; <sup>3</sup>Омск – Барабинск, 06–07.1999; <sup>4</sup> измерения на эвтрофных болотах и рямах Западной Сибири: в 100 км к Западу от г. Новосибирск (“Кузнецкий рям”) и в пос. Николаевка, 50 км к юго-востоку от г. Барабинск (“Николаевка”), 08.2007 и 07.2009; <sup>5</sup>Иркутск – Улан Удэ, 07–08.2007; <sup>6</sup>дельта р. Селенги в Прибайкалье (с. Кабанск, умеренно-засушливая лесостепь) с разнотравно-злаковым сообществом на луговых солончаковых почвах, 07–08.2007; <sup>7</sup>Улан Удэ – Магдагачи, 07–08.2007; <sup>8</sup>40 км. к северо-западу от г. Якутск, 08.1997, 1998; <sup>9</sup>Красноярск – Иркутск, 06-08.2001, средневзвешенное по нескольким эпизодам значение; <sup>10</sup>восточная Канада, май-сентябрь 1994; <sup>11</sup>Новосибирск–Красноярск, 10.2005; <sup>12</sup>Фландрия, Бельгия, осень 1996–2010, средние ночные значения; <sup>13</sup>Омск – Красноярск, 06–07.1999, 06–07.2007; <sup>14</sup>Португалия, 06–08.2004, средние ночные значения; <sup>15</sup>Хабаровск – Владивосток, 06 – 10 (1999, 2005, 2007 гг.); <sup>16</sup>Кане, Пенсильвания, США, 04 – 10.1997, средние ночные значения; <sup>17</sup>Массачусетс, США, 06–11.2000 г, средние ночные значения; <sup>18</sup>Красноярск–Иркутск, 06–07.1999; <sup>19</sup>Онтарио, Канада, 06–08.1988, ночные и утренние значения.

**В заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Существенные вариации приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали от Москвы до Владивостока обусловлены суточной изменчивостью устойчивости пограничного слоя атмосферы. Вклад ночных приземных инверсий температуры в изменение приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$  оценивается примерно в 70-80%. Наибольшие концентрации  $^{222}\text{Rn}$  (45-75 Бк/м<sup>3</sup>) получены в горных регионах России и регионах с крупными тектоническими разломами (Центральная и Восточная Сибирь, Дальний Восток). Осенью приземная концентрация  $^{222}\text{Rn}$  максимальна, а весной - минимальна, что обусловлено сезонной изменчивостью характеристик атмосферного перемешивания (величины и продолжительности инверсий температуры) и состояния почвы (температуры, промерзания и оттаивания, наличия снежного покрова). Рост глубины сезонного протаивания почвы в регионах России, где распространена вечная мерзлота (Восточная Сибирь), может приводить к росту приземной концентрации  $^{222}\text{Rn}$ , обусловленному увеличением потока  $^{222}\text{Rn}$  из почвы за счёт интенсивной миграции накопившегося в замёрзших грунтах  $^{222}\text{Rn}$  в приповерхностный слой почвы и его последующей эксхалляции в атмосферу.

2. Поток  $^{222}\text{Rn}$  из почвы в атмосферу, полученный по измерениям его приземной концентрации в экспедициях TROICA, изменяется над континентальной территорией России от  $29 \pm 8$  до  $95 \pm 51$  мБк м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Наибольшие потоки  $^{222}\text{Rn}$  получены летом в горных регионах Центральной и Восточной Сибири, а также на Дальнем Востоке. Высокие значения потока  $^{222}\text{Rn}$ , полученные осенью 2005 г. на ЕТР, Урале и в Западной Сибири, а также весной в Центральной и Восточной Сибири, обусловлены влиянием локальных факторов: крупных тектонических разломов и антропогенных источников  $^{222}\text{Rn}$ . Полученные оценки потока  $^{222}\text{Rn}$  хорошо согласуются с известными данными

его прямых измерений в различных регионах России и примерно в 3-7 раз превышают модельные оценки, представленные в литературе.

3. Рассчитанные биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$  максимальны летом в Западной Сибири ( $0,77 \pm 0,60$  мкг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) и на Дальнем Востоке ( $0,87 \pm 0,52$  мкг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), где расположены источники  $\text{CH}_4$ : болота и увлажненные почвы, а  $\text{CO}_2$  – в Восточной Сибири ( $1,20 \pm 0,41$  мг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ), где расположены горные лиственничные леса (даурская лиственница). Весной и осенью биогенные эмиссии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в среднем в 4-8 раз меньше, чем летом, что связано с низкой температурой почвы, наличием снежного покрова и замедлением процессов дыхания растений в это время года. Ночной сток  $\text{O}_3$  максимален весной на Урале:  $0,19 \pm 0,17$  мг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и в районе Красноярска:  $0,08 \pm 0,05$  мкг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  и летом в Центральной Сибири (участок Тайшет – Иркутск) -  $0,07 \pm 0,01$  мкг  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , а скорость его сухого осаждения максимальна летом в Восточной Сибири -  $0,33 \pm 0,21$  см/с<sup>-1</sup> и на Дальнем Востоке -  $0,32 \pm 0,25$  см/с<sup>-1</sup>. В целом, летом сухое осаждение  $\text{O}_3$  над территорией России выше, чем весной и осенью.

Полученные оценки биогенных эмиссий  $\text{CH}_4$  и ночного сухого осаждения  $\text{O}_3$  согласуются с опубликованными в литературе данными для ландшафтных и сезонных условий, подобных тем, что наблюдались в экспедициях TROICA. Полученные оценки биогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  находятся на верхней границе или на 30-40% выше значений, представленных в литературе, т.к. они приходятся на ночное время наблюдений и обусловлены дыханием лесной растительности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Максимовский В.А., Решетов В.В., Харламов М.Г. Карта радоноопасности России. Масштаб 1:10 000 000 // Под ред. Смыслова А.А. М. – СПб.: СПбГГИ, 1996. 1 с.
2. Cohen L. D., Barr S., Krablin R., and Newstein H.: Steady-state vertical turbulent diffusion of radon, J. Geophys. Res. 1972. 77. P. 2654-2668.

3. Jacobi W., and Andre K.: The vertical distribution of radon-222, radon-220 and their decay products in the atmosphere, *J. Geophys. Res.* 1963. 68. P.3799–3814.
4. Безуглая Э.Ю., Берлянд М.Е. (ред). Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат. 1983, 328 с.
5. Pasquill F.: The Estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorological Magazine.* 1961. 90. P. 33-49.
6. Беликов И.Б., Бренникмайер К.А.М., Еланский Н.Ф., Ралько А.А. Приповерхностная концентрация метана и оксидов углерода над континентальной территорией России по результатам экспериментов TROICA. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. №1. С. 50-63.
7. Schmidt M., Graul R., Sartorius H., and Levin I.: Carbon dioxide and methane in continental Europe: a climatology, and 222 radon-based emission estimates, *Tellus.* 1996. 48. P.457–473.
8. Biraud S., Ciais P., Ramonet M., Simmonds P., Kazan V., Monfray P., O’Doherty S., Spain T., and Jennings S.: European greenhouse gas emissions estimated from continuous atmospheric measurements and radon-222 at Mace Head., *J. Geophys. Res.* 2000. 105. P.1351–1366.
9. Pio C.A., Feliciano M., Vermeulen A.T., Sousa E.C. Seasonal variability of ozone dry deposition under southern European climate conditions, in Portugal. // *Atmospheric Environment.* 2000. V. 34. Issue 2. P. 195–205. doi:10.1016/S1352-2310(99)00276-9.
10. Wu Z., Wang X., Chen F. et al. Evaluating the calculated dry deposition velocities of reactive nitrogen oxides and ozone from two community models over a temperate deciduous forest. // *Atmospheric Environment.* 2011. V. 45. P. 2663-2674. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.063.
11. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics. // *Global Biogeochem. Cycles.* 2002. V. 14. Issue 4. P. 1071–1080. doi:10.1029/1999GB900097.
12. Глаголев М.В., Филиппов И.В., Клепцова И.Е., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана из типичных болотных ландшафтов севера Западной Сибири // в сборнике: *Материалы по изучению русских почв.* СПб. 2009. Изд-во СПбГУ. 6(33), С. 57-61.

13. Shibistova O., Lloyd J., Evgrafova S. et al. Seasonal and spatial variability in soil CO<sub>2</sub> efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest. // *Tellus B – Chemical and Physical Meteorology*. 2002. V. 54. Issue 5. P. 552– 567.
14. Masyagina O.V., Prokushkin S.G., Mori S. et al. CO<sub>2</sub> emissions of the non-tree vegetation cover in larch (*Larix gmelinii* (Rupr.)) stands in the Central Evenkia region of Siberia, Russia. // *Eurasian Journal of Forest Research*. 2006. V. 9. Issue 1. P.17-28.
15. Ullah S, Moore T. Topographic controls of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from temperate and boreal forest soils in eastern Canada. // *Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Process Study Newsletter*. 2009. No.7. P.30-32.
16. Neiryneck J., Gielen B., Janssens I.A., Ceulemans R. Insights into ozone deposition patterns from decade-long ozone flux measurements over a mixed temperate forest. // *Journal of Environmental Monitoring*. 2012. V. 14, P. 1684–1695. doi: 10.1039/C2EM10937A.
17. Tang G., Li X., Wang Y. et al. Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001–2006. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2009. V. 9. P. 8813–8823. doi:10.5194/acp-9-8813-2009.
18. Droppo Jr. J. G. Concurrent measurements of ozone dry deposition using eddy correlation and profile flux methods. // *J. Geophys. Res.* 1985. V 90 (D1). P. 2111–2118, doi:10.1029/JD090iD01p02111.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА В РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ.

1. Березина Е.В., Еланский Н.Ф. Концентрация <sup>222</sup>Rn в приземном слое атмосферы над континентальной территорией России по наблюдениям в экспериментах TROICA // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 6. С. 809–822.
2. Berezina E. V., Elansky N. F., Moiseenko K. B., Belikov I. B., Shumsky R. A., Safronov A. N. and Brenninkmeijer C. A. M. Estimation of nocturnal <sup>222</sup>Rn soil fluxes over Russia from TROICA measurements, *Atmos. Chem. Phys.* 13. 2013. P.11695-11708. doi:10.5194/acp-13-11695-2013.
3. Березина Е.В., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Лаврова О.В., Беликов И.Б., Шумский Р.А. Оценка биогенных эмиссий CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> и сухого осаждения O<sub>3</sub> по измерениям <sup>222</sup>Rn в экспедициях TROICA // *Изв. РАН.*

Физика атмосферы и океана. 2014. № 6. Принято к публикации.

4. Еланский Н. Ф., Мохов И.И., Беликов И. Б., Березина Е. В., Елохов А. С., Иванов В. А., Панкратова Н. В., Постыляков О. В., Сафронов А. Н., Скороход А. И., Шумский Р. А. Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // Доклады академии наук. 2011. Т. 437. № 1. С. 90–96.

5. Еланский Н.Ф., И.И. Мохов, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, А.С. Елохов, В.А. Иванов, Н.В. Панкратова, О.В. Постыляков, А.Н. Сафронов, А.И. Скороход, Р.А. Шумский. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г.//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С.729-738.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА В НЕРЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ.

1. Березина Е.В., Еланский Н.Ф. Пространственное и временное распределение концентраций  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое атмосферы над континентальной территорией России по данным экспедиций TROICA // Изменения окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы. / Пред. Ред. кол.: Н.П. Лаверов. Изменения климата: влияние внеземных и земных факторов / Отв. ред Г.С.Голицын. М.: ИФА РАН, ИФЗ, ISBN 978-5-91682-007-2. Т. 6. 2008. С. 137-147.

2. Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Березина Е.В. и др. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA. Под ред. Н.Ф. Еланского//М.: Агростпас, 2009. 80 с.

3. Elansky N.F., Belikov I.B, Berezina E.V et al.: Atmospheric Composition Observations over Northern Eurasia using the Mobile Laboratory: TROICA experiment, edited by Elansky N.F., Agrospas, Moscow, Russia. 2009. 72 pp.

4. Березина Е.В.  $^{222}\text{Rn}$  в приземном слое атмосферы над территорией России и его использование для исследования различных атмосферных процессов. Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты: труды XIV всероссийской школы - конференции молодых ученых / Рос.акад.наук, Ин-т приклад.физики [и др.]. - Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2010. – 164 с.

5. Березина Е.В., Сафронов А.Н., Еланский Н.Ф. Пространственное и временное распределение  $^{222}\text{Rn}$  по территории России вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали по данным экспедиций TROICA. XI Всероссийская школа - конференция



молодых ученых: "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты", Нижний Новгород, 15-18 мая 2007 г. С. 27 -28.

6. Березина Е.В., Еланский Н.Ф. Концентрация  $^{222}\text{Rn}$  в приземном воздухе и его эмиссии над территорией России. XII международная конференция молодых ученых: "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы", Борок, 19-23 мая 2008. С. 37 -38.

7. Березина Е.В., Еланский Н.Ф.  $^{222}\text{Rn}$  и его использование для оценок эмиссий парниковых газов в приземном слое атмосферы над территорией России. XIII Международная школа - конференция молодых ученых: "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты", Звенигород, 19-22 мая 2009 г. С. 92 -93.

8. Березина Е.В. Особенности распределения концентраций и потоков  $^{222}\text{Rn}$  над территорией России. XIV всероссийская школа - конференция молодых ученых: "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты", Нижний Новгород, 18-21 мая 2010 г. С. 40.

9. Berezina E.V., Belikov I.B., Elansky N.F. Spatial and temporal distribution of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in the atmospheric surface layer over Russia from TROICA experiments. Proceedings of the 2nd Accent Symposium "Atmospheric Composition Change", Urbino, Italy, 23-27 July 2007, CD.

10. Березина Е.В., Сафронов А.Н., Еланский Н.Ф. Концентрация  $^{222}\text{Rn}$  в приземном воздухе и его эмиссии из почвы на территории России по наблюдениям в экспериментах TROICA. Всероссийская конференция "Развитие системы мониторинга состава атмосферы (PCMCA)". Тезисы докладов, Москва, 16-18 октября 2007 г. С. 27-28.

11. Berezina E.V., Elansky N.F. Spatial and temporal distribution of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations and its fluxes in the lower atmosphere over continental Russia. International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, Proceedings, Bergen, Norway, 15 – 20 June 2008, CD.

12. Elansky N., I. Belikov, E. Berezina, A. Elokhov, V., Kopeikin, O.Lavrova, N. Pankratova, A. Safronov, R. Shumsky, A. Skorokhod. TROICA Mobile Observatory and

intercontinental Monitoring of the atmospheric composition over Russia: Summary of eleven expeditions. IGAC 10th International Conference. Annecy, France, 8-12 September 2008. p.1.

13. Berezina E.V., Elansky N.F. The use of  $^{222}\text{Rn}$  for estimation of greenhouse gases emissions at Russian territory. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU 2009-237, 2009.

14. Berezina E.V.  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  concentrations and emissions in the atmospheric surface layer over Russia from TROICA observations. The 1st World Conference PETra 2011 Pollution and Environment - Treatment of Air, Prague, Czech Republic, 17-20 May 2011, CD.