

На правах рукописи

**БУТУХАНОВ Василий Петрович**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО  
ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА.**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Отделе физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Ломухин Юрий Лупонович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор Кашкин Валентин Борисович  
  
кандидат технических наук,  
доцент Сакаш Ирина Юрьевна

**Ведущая организация:** Восточно-Сибирский технологический университет (г. Улан-Удэ)

Защита диссертации состоится «15» мая 2009 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 в Сибирском федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус Ж ауд. УЛК 1-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по техническим наукам Сибирского федерального университета. Автореферат выставлен на сайт СФУ.

Отзыв на автореферат в 2-ух экземплярах, с подписью составителя и заверенный печатью организации просим направлять в адрес диссертационного совета. Факс 8 (3912) 90-74-76, 43-26-56.

Автореферат разослан «10» апреля 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

кандидат технических наук, профессор



Е.А. Вейсов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена изучению режима приземного озона для оценки и прогноза его концентраций в различных метеорологических условиях. Рассматриваются механизмы изменчивости концентрации озона в атмосфере Байкальского региона. Работа написана на основе экспериментального материала, полученного в результате шестилетнего наблюдения газовых и метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы.

**Актуальность работы.** В приземном слое атмосферы и в тропосфере озон является химически и радиационно-активным газом. Как сильный окислитель он воздействует разрушающе на многие материалы и живые ткани. Кроме этого, он определяет газовый состав и термический режим тропосферы. Основным источником приземного озона является фотохимическое образование в тропосфере и перенос в ее нижние слои динамическими процессами различного масштаба.

Поэтому для оценки и прогноза приземной концентрации озона (ПКО) возникает необходимость изучения ее пространственно-временных вариаций в приземном и приземном слое атмосферы.

В результате антропогенной нагрузки на окружающую среду в 70 - 90 годах 20 века наблюдалось уменьшение озона в стратосфере, и его увеличение в тропосфере Северного полушария. В Азиатском регионе Северного полушария наблюдалось медленное, но стабильное увеличение концентрации озона в течение 1980-1995г.г. с положительным трендом  $0,44 \pm 0,43\%$  в год, а с 1996 г. по настоящее время ее рост приостановился [S.J.Oltmans, A.S.Lefohn, H.E.Schell, D.S..Shadwick et. al., 1998г.].

Так как Байкальский регион до настоящего времени не охвачен сетью наблюдений приземного озона, проведение наблюдений ПКО будет способствовать оценке уровней озона в загрязненных и фоновых условиях. И на основе этих оценок можно выявить механизм изменчивости озона, характерного для данного региона. Всесторонний анализ выявленных причин изменчивости озона в пространстве и во времени, в условиях формирования высоких значений ПКО позволит принять меры по предотвращению нарушения экологического равновесия в окружающей природной среде Байкальского региона и озера Байкал как участка Мирового наследия. В связи с этим работа, посвященная наблюдению приземной концентрации озона и ее изменчивости в пространстве и во времени, является актуальной.

**Целью диссертации** является выявление особенностей пространственно-временных вариаций ПКО в Байкальском регионе. В работе решались следующие **задачи**:

1. Разработка и создание измерительно-вычислительного комплекса

для регистрации и расчета статистических характеристик пространственно-временного распределения приземного озона, оксидов азота, углерода в Байкальском регионе.

2. Анализ временных вариаций ПКО, концентраций оксидов азота и метеопараметров по данным измерений за период с 1999 – 2004 г.г. в г. Улан-Удэ; выявление процессов, определяющих формирование суточного и сезонного хода ПКО.

3. Оценка вклада ОСО и УФ-Б в сезонную изменчивость ПКО.

4. Анализ процессов, формирующих особый режим образования озона в условиях летнего застоя воздуха в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ.

5. Организация и проведение измерений концентрации озона, оксидов азота и метеопараметров в приземном и приземном слое атмосферы оз. Байкал.

### **Научная новизна**

1. Получены характеристики суточной и сезонной изменчивости концентрации приземного озона в г. Улан-Удэ за период 1999-2004 г.г. Выявлен суточный ход ПКО с характерными максимумами в 13:00 и 0:00 ч и двумя минимумами в 8:00 и 21 ч местного времени; сезонный ход с максимумом в конце весны - начале лета, минимумом поздней осенью и в начале зимы.

2. Впервые в условиях Байкальского региона установлено запаздывание ПКО от ОСО в среднем на 3 месяца, выявлены квазидвухлетние вариации ОСО и ПКО в весенний период.

3. В условиях летнего застоя установлены: квазипериодическая структура изменчивости среднедневных концентраций озона, оксидов азота и температуры воздуха с периодом от 3 до 5 дней; смещение максимумов спектральной плотности ПКО от максимумов УФ-Б на периоды до одного дня и 20 дней. Предложена модель краткосрочного прогноза ПКО.

4. По наблюдениям в летний период на побережье Байкала выявлены 2 режима суточного хода ПКО с максимумом в 13:00 ч. и минимумом в ночные часы, с более поздним максимумом в 18:00 ч и минимумом в утренние часы. Получены оценки фотохимического образования и вертикального распределения озона.

5. Впервые выявлены пространственные неоднородности распределения озона и оксидов азота в приземном слое атмосферы разных частей оз. Байкал. Оценена скорость сухого осаждения озона на водную поверхность.

### **Достоверность полученных результатов определяется:**

- оценкой и корректировкой погрешности измерений приборов, входящих в состав измерительного комплекса, регулярными поверками, установленными Государственной системой единства измерений;
- внутренним оперативным контролем, выполняющим функции предупредительного контроля для принятия оперативных мер в ситуациях, когда

погрешности (составляющие погрешностей) контрольных измерений не соответствуют установленным требованиям. В качестве средств контроля используются стандартные образцы, аттестованные смеси, рабочие пробы и генераторы калибровочных смесей.

- статистической обеспеченностью данных измерений характеристик газовых примесей и метеопараметров, согласованностью экспериментальных и расчетных данных.

### **Научная и практическая значимость работы**

Результаты исследований пространственно-временного распределения концентраций озона и МГС в Байкальском регионе использованы в региональных прогностических моделях изменения газового состава атмосферы под влиянием различных геофизических факторов.

Полученные результаты использованы для оценки экологической обстановки в г. Улан-Удэ, состояния воздушного бассейна оз. Байкал, и могут учитываться в целях определения ресурса туристско-рекреационной зоны “Байкал” на Восточном побережье озера.

Измерительный комплекс газовых характеристик приземного слоя атмосферы может найти применение на станциях мониторинга газовых примесей в различных регионах.

### **Личный вклад автора**

Основные результаты работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании измерительного комплекса, валидации программы автоматизации непрерывных измерений и регистрации содержания газовых примесей в приземном слое атмосферы, методики измерений, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных.

**На защиту выносятся** результаты мониторинга ПКО с помощью измерительного комплекса на базе хемилюминесцентных газоанализаторов:

1. Суточная изменчивость ПКО в г. Улан-Удэ за период с 1999 по 2004 год с максимумами в 13:00 и 0:00 ч и минимумами - в 3:00 и 21:00 ч местного времени близка к фоновой. Сезонные вариации максимальных значений ПКО в конце весны, начале лета наблюдаются при весенне-летней активизации динамических и фотохимических процессов в атмосфере г. Улан-Удэ. Минимальные значения ПКО в зимний период отмечаются при максимальной повторяемости приземных инверсий.

2. В годовом ходе смещение по фазе максимальных и минимальных значений ОСО относительно аналогичных значений ПКО близко к 1/4 периода их основных гармоник (максимумы ОСО и ПКО над г. Улан-Удэ достигаются в марте и в июне, соответственно). Выявленные квазидвухлетние вариации ОСО и ПКО в весенний период значимы и свидетельствуют о существен-

ной модулирующей роли крупномасштабной циркуляции в формировании режима озона.

3. В условиях летнего застоя воздуха в г. Улан-Удэ изменения средних дневных ПКО, концентрации оксидов азота модулируются колебаниями с характерным периодом от 3 до 5 дней. Максимумы спектральной плотности вариаций средних дневных ПКО смещены относительно максимумов интенсивности УФ-Б в области низких частот на период в 20 дней, в области высоких частот на период меньше одного дня.

4. Суточный ход концентрации озона в летний период наблюдения на побережье оз. Байкал определяется двумя режимами вариаций ПКО - с максимумом в 13:00 ч, минимумом в ночные часы и с более поздним максимумом в 18:00 ч и минимумом в утренние часы. Среднесуточные значения концентрации озона на побережье оз. Байкал в условиях неустойчивой атмосферы с параметром стратификации  $-0,7 \leq Ri \leq -0,2$  в 1,5 раза меньше, чем в городских условиях, а максимум ПКО отстает от максимума концентрации озона в г. Улан-Удэ на 5 часов.

5. Пространственно-временная неоднородность концентрации озона и оксидов азота в приводном слое атмосферы оз. Байкал. В Южном Байкале максимум ПКО в послеполуденное время соответствует максимальной высоте слоя перемешивания. В Среднем Байкале основной вклад в формирование вечернего максимума ПКО вносит адвекция воздушных масс с прибрежной зоны. Скорость сухого осаждения озона на водную поверхность Байкала меняется от 0,0019 до 0,096 см/с и соответствует раннее проведенным наблюдениям в приводном слое атмосферы морских акваторий. В период активного развития волнового процесса наблюдается увеличение скорости сухого осаждения озона.

**Основные результаты исследования были получены в работах по следующим проектам:**

1. «Изучение особенностей аэрозольных и газовых примесей в пограничном слое оз. Байкал». Грант РФФИ № 97-06-96449.

2. «Исследование механизмов формирования загрязнения атмосферного воздуха южного побережья оз. Байкал под воздействием удаленных и близкорасположенных промышленных центров». Грант РФФИ № 01-05-97240.

3. «Климатоэкологический мониторинг Сибири». Региональная научно-техническая программа «Сибирь».

### **Апробация работы**

Материалы, изложенные в диссертации, представлены в 26 печатных работах, из них 10 работ опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также докладывались на Всероссийских конференциях «Аэрозоли Сибири» в 1997 – 1999 г.г., 2003 г.г., на третьей Верещагинской Байкальской конферен-

ции в 2000 г., на VIII – XI Международном объединенном симпозиуме. Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы, 2001-2004 г.г., на Международном рабочем совещании TOR-2 по исследованию тропосферного озона в 2002 г. и др. региональных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 187 страниц текста, 66 рисунков, 11 таблиц. Список литературы состоит из 118 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность работы, ставится цель работы, указывается научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержатся необходимые сведения и современные взгляды на природу приземного озона, дана характеристика его источников и стоков.

Тропосферный озон не превышает 10% от общего содержания озона в атмосфере. Концентрация озона в приземном воздухе изменяется в широких пределах в зависимости от геофизических, климатических характеристик регионов и степени их промышленного развития, влияющего на уровень антропогенного загрязнения атмосферы. Следует отметить, что антропогенные факторы, такие как эмиссии предшественников озона (окислов азота и органических соединений) могут приводить как к дополнительной генерации, так и к разрушению озона в приземном слое. Вторая ситуация наблюдается в условиях сильного загрязнения приземного слоя атмосферы окислами азота в холодный период.

В главе рассматриваются результаты многолетних наблюдений пространственного распределения тропосферного озона по всему Земному шару. Показано, что обширные континентальные районы Евразийского материка являются глобальными источниками атмосферного загрязнения газовыми примесями, участвующими в образовании и разрушении озона в глобальном масштабе. Результаты измерений свидетельствуют также и о том, что скорость роста содержания озона от экватора к полюсам Земли в нижнем слое тропосферы для северного полушария больше, чем для южного. Соответственно и концентрация озона на одинаковых широтах северного и южного полушария различается (концентрация озона выше в северном полушарии). Одной из возможных причин различия уровня озона в нижней тропосфере в северном и южном полушарии может быть его крупномасштабное продуцирование в результате фотохимических реакций в условиях интенсивной антропогенной эмиссии над Европой. Так, например, европейские источники вносят вклад в годовой бюджет производства озона на высокогорной альпийской станции в Ароза 9-12 ppb [Pochanart et.al., 2001].

Траекторный анализ показал, что именно в нижней тропосфере загрязнение над Европой может транспортироваться и изменять уровень озона в Восточной Азии и Сибири [Akimoto et.al., 1994]. А воздушные массы с повышенным содержанием озона из Северной Америки оказывают большое влияние на состав средней тропосферы Европы.

Озон, образовавшийся в условиях высокой инсоляции, температуры и большом уровне его предшественников в Восточной Азии легко переносится в верхней тропосфере в Северную Америку и Европу западным ветром зональной циркуляции (трансграничный перенос) [Израэль, 1987].

Исследования газового и аэрозольного состава атмосферы, выполненные в ходе экспедиции TROICA-5 в летний период, выявили перенос примесей из промышленных районов Восточной Азии на территорию Российской Федерации. Наиболее вероятной причиной наблюдавшихся высоких концентраций приземного озона в городах Хабаровского края явилась его фотохимическая генерация в шлейфе антропогенных выбросов городов Китая и Японии при наличии местных источников летучих органических соединений ЛОС и окислов азота [Еланский, Моисеенко, Панкратова, 2005].

Несмотря на большое количество измерений озона ( $O_3$ ) в Европе, его крупномасштабный перенос в тропосфере и пограничном слое по Азиатской части России недостаточно исследован. Поэтому комплексный мониторинг пространственно-временных вариаций ПКО для изучения и анализа воздействия регионального распределения озона на биосферу с одной стороны, а с другой стороны для оценки локального содержания озона в его глобальном распределении является актуальным.

**Во второй главе** изложена методика выполнения измерений, основные технические характеристики и принцип действия измерительного комплекса.

С целью оперативной обработки результатов измерений с заданной точностью и минимальными затратами ручного труда создан 4 канальный измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), объединяющий средства измерения, систему регистрации, хранения и обработки результатов измерений [8].

В таблице 1 приведены основные технические характеристики средств измерений, входящие в состав ИВК.

Таблица 1. Средства измерений и их основные технические характеристики

№№ п/п	Измеряемое вещество	Наименование измеряемой величины	Тип средства измерения	Диапазон измерения, мг/м <sup>3</sup>	Погрешность, %	Чувствительность, мг/м <sup>3</sup>
1.	NO <sub>2</sub>	массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	P-310-32	0+1	± 25	0,001
2.	NO	массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	P-310-32	0+1	± 25	0,001
3.	O <sub>3</sub>	массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	3.02П1	0+0,5	± 15	0,001

Измерения концентраций озона (O<sub>3</sub>), оксидов азота (NO, NO<sub>2</sub>) производились газоанализаторами, представляющими собой газовые компараторы, в основу работы которых положен хемилюминесцентный метод. Сущность этого метода состоит в том, что химическое взаимодействие молекул озона и диоксида азота с датчиком сопровождается люминесценцией. Принцип действия газоанализаторов – гетерогенная хемилюминесценция (газ – "твердое тело"). Датчиками газов служат хемилюминесцентные твердотельные сенсоры. Интенсивность хемилюминесценции пропорциональна содержанию озон и диоксида азота в анализируемой газовой среде.

На рис. 1 показана функциональная схема ИВК.

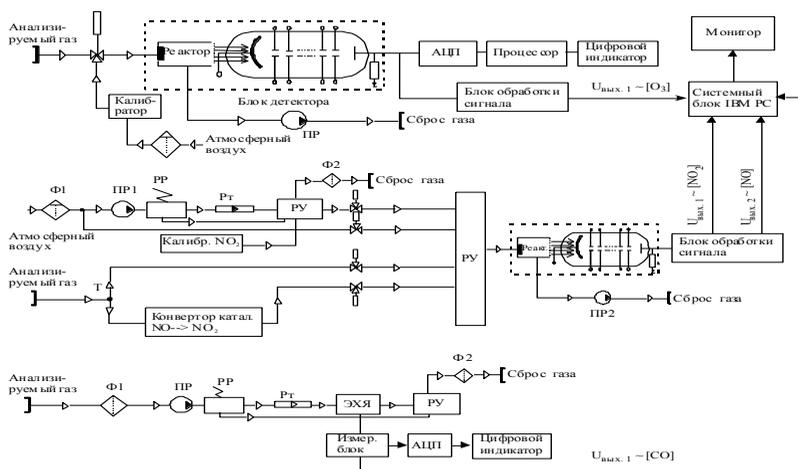


Рис. 1. Функциональная схема 4-канального измерительного комплекса.

Описаны основные рабочие и калибровочные алгоритмы, созданного

программного обеспечения, и защищенного свидетельством об авторском праве под №200611005 (Роспатент) [9].

Приводятся условия измерений, рабочие процедуры по подготовке к выполнению измерений, выполнение измерений.

Для оценки погрешности результатов измерений осуществляется внутренний контроль точности результатов измерений. Приведены средства и алгоритм контроля точности измерений.

Данные по оценке точности определения концентрации озона и диоксида азота за весь период наблюдения показали, что:

1) точность результатов измерений на уровне  $\alpha = 5\%$  считается удовлетворительной;

2) случайные погрешности не выходят за пределы доверительного интервала и оцениваются удовлетворительной прецизионностью (степень близости друг к другу независимых результатов измерений).

Измерения метеопараметров проводились ультразвуковой автоматической метеостанцией АМК-02Б. Станция предназначена для автоматических измерений и регистрации мгновенных и средних значений температуры воздуха, скорости и направления горизонтального ветра, скорости вертикального ветра, относительной влажности воздуха, атмосферного давления.

Преимущества современной метеостанции АМК-02Б перед известными электромеханическими метеостанциями: 1) автоматические непрерывные (круглосуточные) измерения без участия оператора; 2) безынерционность и очень высокая чувствительность при измерениях температуры и скорости ветра; 3) возможность измерений в любых реальных погодных условиях, в том числе при выпадении атмосферных осадков; 4) возможность регистрации турбулентных флуктуаций температуры и скорости ветра; 5) автоматическое определение стандартных параметров атмосферной турбулентности.

**В третьей главе** приводятся методы обработки и анализ полученных экспериментальных данных приземной концентрации озона, оксидов азота, монооксида углерода и метеорологических параметров, в г. Улан-Удэ за шестилетний период наблюдения (1999-2004 г.г.).

В разделе 3.1 проведен анализ метеорологических параметров. Годовой ход температуры воздуха в Улан-Удэ характерен для условий резко континентального климата. Ветровой режим города определяется потоками общей циркуляции. Но из-за сильной изрезанности рельефа и резко континентального климата создаются условия, характерные для атмосферы с низкой рассеивающей способностью газовых примесей. В течение года в Улан-Удэ преобладают скорости ветра 2,2 м/с, т.е. ветры слабые и умеренные. При этом продолжительность периодов со штилями достигала зимой – 51%, а весной снижается до 24%. Во все месяцы года преобладают ветры западного, северо-западного и восточного направлений. Максимальную повторяемость в течении года имеют

ветры северо-западного направления (24%), минимальную – юго-восточные (1%).

Измерения вертикального распределения температуры и влажности воздуха в 100 метровом приземном слое показали, что повторяемость приземных и приподнятых инверсий в зимний период довольно высока - 77% случаев, за весь период измерений. Мощность слоя приземной инверсии в основном составила 100 метров. Максимальный градиент температуры был равен  $-5,7^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ . Данные условия способствуют накоплению газовых примесей, образованных антропогенными выбросами и уменьшению концентрации озона. В летний период повторяемость дневных конвективных потоков преобладает над инверсией - 30% и 5% случаев за весь период наблюдений, соответственно. Конвективные движения воздушных масс при высокой инсоляции создают благоприятные условия для генерации озона.

В разделе 3.2 для количественного анализа данных наблюдений приземной концентрации озона, и выявления факторов влияния на ее распределение были рассчитаны статистические параметры, и построены функции распределения.

На рис. 2 приведена интегральная функция распределения среднесуточных ПКО.

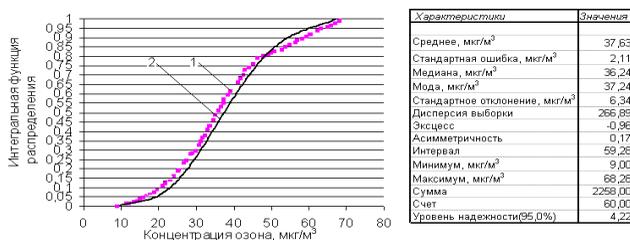


Рис. 2. График функций распределения среднесуточных ПКО за период наблюдения 1999-2004 г.г.

Из графиков видно, что распределение эмпирических рядов наблюдения (кривая 1) среднесуточных концентраций озона близко к нормальному распределению (кривая 2). При незначительной асимметрии функции распределения наблюдается некоторое смещение эмпирических рядов ПКО относительно нормального распределения в сторону уменьшения в интервале 15-45 мкг/м<sup>3</sup> и в сторону увеличения в интервале от 50-68 мкг/м<sup>3</sup>.

Среднее значение эмпирического ряда ПКО, равное 34 мкг/м<sup>3</sup> меньше среднего значения в ряду нормального распределения ПКО на 3,5 мкг/м<sup>3</sup> и превышает стандартную ошибку, равную 2 мкг/м<sup>3</sup>, но находится в пределах допустимой погрешности измерения. Однако в области высоких и низких концентраций различия рядов ПКО существенны. Поэтому была предпринята попытка выяснения причин и механизмов влияния на отклонение фактического рас-

предела средних ПКО от нормального распределения. К факторам, которые могли бы оказать существенное влияние на функцию распределения измеренных значений ПКО в интервале концентраций меньших среднего, относятся приземные инверсии в холодное время года. В области высоких ПКО больших ее среднего значения на распределение озона оказывают фотохимические процессы генерации в летний период. Эти условия летом чаще всего реализуются в антициклонах и малоградиентных барических полях. Значительный вклад в повышение приземной концентрации озона вносит весенняя активизация динамических процессов. К ним относятся СТО, меридиональная и зональная циркуляции, процессы синоптического масштаба (циклоны, фронты и т.д.), турбулентное перемешивание и конвекция.

Анализ среднесуточных ПКО (раздел 3.3) показал значительное сезонное изменение уровней ПКО: средние максимальные концентрации летом достигают значения  $83 \text{ мкг/м}^3$ , а минимальные зимой –  $10 \text{ мкг/м}^3$ . Из графика среднесуточных концентраций приземного озона на рис. 3, полученных в г. Улан-Удэ за шестилетний период измерения видно, что изменения среднесуточных ПКО представляют собой периодические колебания, и наблюдается тенденция уменьшения максимальных среднесуточных ПКО с 1999 г. по 2003 г.

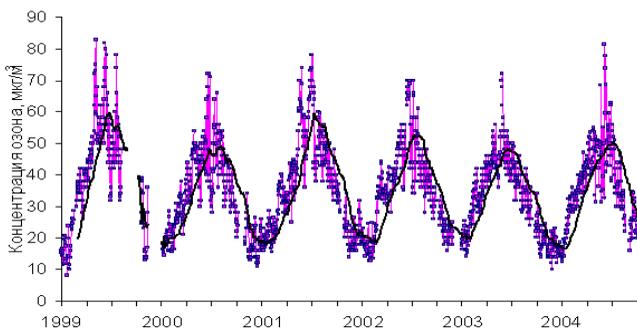


Рис. 3. Среднесуточные концентрации приземного озона.

Установлено, что основной вклад в годовое изменение концентрации озона вносят сезонные вариации среднесуточных ПКО, зависящие от метеорологических и синоптических процессов, а в отдельные годы в летний период от аномалий интенсивности солнечной радиации.

На рис. 4 показано, что в период весенней активизации синоптических процессов вариации ПКО тесно связаны с вариациями приземного давления. Из рисунка видно, что приход антициклона, связанного с усилением меридиональной циркуляции воздушных масс приводит к резкому увеличению ПКО и приземного давления. С приходом циклональных воздушных масс наблюдается значительное понижение атмосферного давления и уменьшение ПКО до

своего минимума равного  $15 \text{ мкг/м}^3$ .

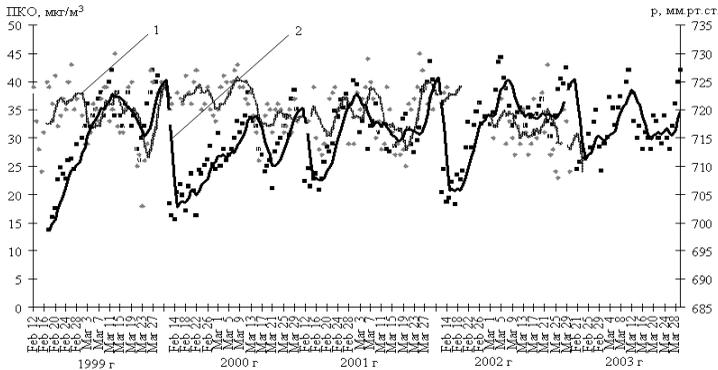


Рис. 4. Вариации приземного давления (1), ПКО (2) в условиях весенней активизации синоптических процессов (циклонов и антициклонов)

Раздел 3.4 посвящен анализу суточной и сезонной изменчивости ПКО за указанный период наблюдения. Для определения сезонно-суточной изменчивости ПКО в г. Улан-Удэ ряды ежедневных значений в конкретное время суток были разложены в ряд Фурье по гармоникам годового хода:

$$\rho_n(t) = \sum_k A_k \cos[\omega(t - t_k)] + residuals \quad (1)$$

где:  $\rho_n(t)$  - значения ПКО в день  $t$  и срок наблюдения  $n$  ( $n = 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21$  часов);

$A_k^{(n)}$  и  $t_k^{(n)}$  - амплитуда и фаза  $k$ -ой гармоники для срока  $n$ , определяемые по методу наименьших квадратов;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T = 365.25$  - угловая частота и период первой гармоники сезонного хода;

$residuals(t)$  - остатки ежедневных значений ПКО, представляющие собой отклонение (разность) между измеренными и расчетными (выравненными) значениями концентрации озона.

Таким образом, годовой ход был представлен суммированием первой гармоники, уровень статистической значимости которой был не менее 95%.

Коэффициент детерминации полученного годового хода ПКО для разных сроков наблюдения варьируется от 60% (3 часа) до 68% (12 часов), а для

среднесуточных значений превышает 71%. Результаты расчета сезонно-суточной изменчивости ПКО по выражению (1) отражены на рис. 3 и 5. Как видно из рисунков, наибольшие концентрации озона наблюдаются в начале лета, а наименьшие поздней осенью и в начале зимы.

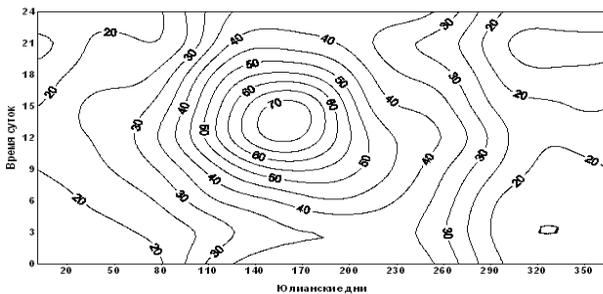


Рис. 5. Сезонно-суточная изменчивость ПКО в Улан-Удэ,  $\text{мкг}/\text{м}^3$

Такой характер сезонного хода, как правило, отмечается и в других городах. Суточная изменчивость с двумя максимумами в 0:00 и 13:00 часов и двумя минимумами около 8:00 и 22:00 часов близка к фоновой.

Определены характерные для региона амплитудные и фазовые характеристики годового хода ПКО включительно до пятой гармоники в различные сроки наблюдения.

В разделе 3.4 исследована связь временных вариаций ОСО и ПКО. Данные ОСО использовались по результатам спутникового зондирования для координат г. Улан-Удэ [10].

Установлено, что максимумы годового хода ПКО за период с 1999 по 2004 г отстают от соответствующих значений ОСО в среднем на время близкое трем месяцам, это хорошо видно из рис. 6 а.

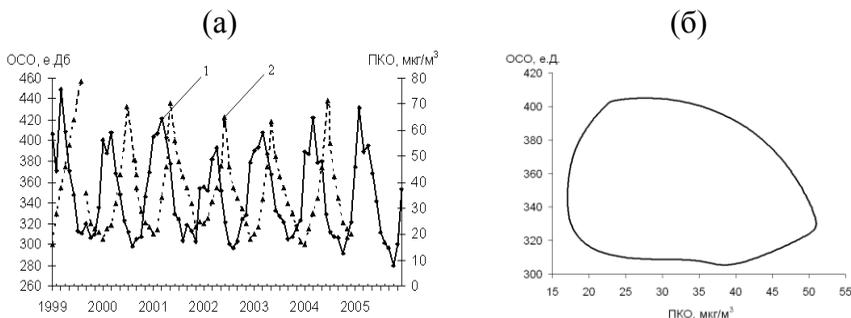


Рис. 6. Годовые вариации среднемесячных ОСО - 1 и ПКО - 2 (а), относительная фазировка (разность фаз) годового хода среднесуточных значений ОСО и ПКО (б) в Улан-Удэ.

Проведен анализ разности фаз ПКО и ОСО. На рис. 6 б представлена фазовая диаграмма годового хода среднесуточных ОСО и ПКО. Близость фазовой кривой к окружности указывает на фазовый сдвиг в четверть периода основных гармоник (первых гармоник) ОСО и ПКО. Небольшое отличие от окружности обусловлено влиянием на сезонный ход ОСО и ПКО 5 гармоники с периодом в 72 дня.

Объясняются причины взаимосвязи ОСО и ПКО в их сезонном ходе. Так, положительная корреляция (коэффициент корреляции  $R = 0,6$ ) отклонений (остатков) ежедневных ПКО от их средних выравненных значений по основной гармонике сезонного хода в весенний период с аналогичными остатками ОСО отражает преобладание антициклонической циркуляции с нисходящими потоками в г. Улан-Удэ.

Выявлены квазидвухлетние колебания ОСО и ПКО. На рис. 7 показаны колебания среднеквадратических отклонений ПКО и ОСО в весенний период (март) за все годы наблюдения.

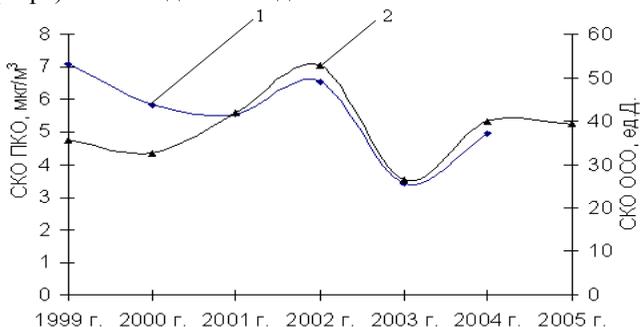


Рис. 7. Стандартные отклонения ПКО - 1 и общего содержания озона - 2.

Из рисунка видно, что в марте за период с 2001 по 2004 г вариации ПКО синхронно следуют вариациям ОСО с квазипериодом максимальных значений в 2 года.

Раздел 3.5 посвящен анализу изменчивости ПКО в летний период. Особенности вариаций ПКО и УФ - эритемной освещенности<sup>1</sup> показали, что радиационный режим гораздо сильнее влияет на значение минимума ежедневных значений ПКО, нежели на значения ее максимума (УФ радиация на рис.8 показана жирной линией).

<sup>1</sup> В умеренных широтах коэффициент корреляции между УФ - эритемной освещенностью и интегральной освещенностью в УФ-Б диапазоне ( $\lambda < 315$  нм) существенно выше 90%, поэтому УФ - эритемная освещенность может служить достаточно надёжным индикатором режима УФ-Б освещенности.

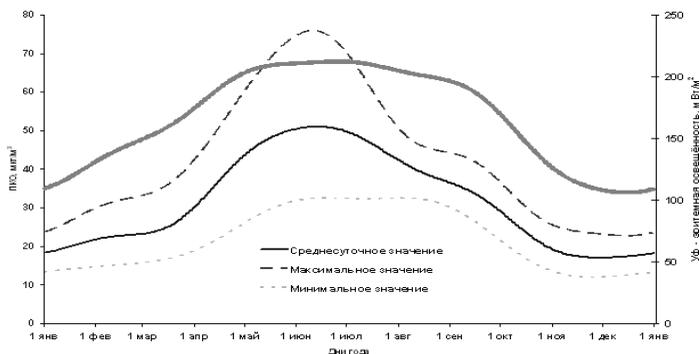


Рис. 8. Сезонный ход динамического диапазона суточной изменчивости ПКО

Однако вариации ПКО в период летнего застоя воздуха (июнь-июль) были связаны с интенсивной фотохимической генерацией озона при высокой инсоляции и температуре воздуха. Механизмы генерации озона показаны в главе 1 и 3.3.1. Главным условием является наличие солнечной радиации с длиной волны  $\lambda < 315$  нм.

Для июня месяца в Улан - Удэ анализ отклонений УФ-Б и ПКО от средних значений показал неопределенность влияния колебаний УФ-Б на вариации ПКО в интервале времени от 1 до 5 дней. Установлено, что максимумы УФ-Б в сглаженной кривой отклонений от средних значений опережают аналогичные максимумы ПКО на 15-20 дней.

Установлено, что при запаздывании изменений ПКО от УФ-Б на 15 дней максимальный коэффициент корреляции между вариациями УФ-Б и ПКО равен  $R = 0,75$ . При этом отклонение (увеличение)  $\Delta$ УФ-Б от среднего значения на 1% приводит к отклонению (увеличению) ПКО на 6,6%.

Рассчитаны спектральные плотности мощности вариаций средних дневных ПКО и интенсивности УФ-Б в аномальных метеорологических условиях. Установлено, что в их спектрах наблюдаются по 2 максимума, соответственно в высокочастотной и низкочастотной областях при этом “высокочастотные” максимумы смещены по частоте до одного дня, а низкочастотные колебания - на 20 дней. Предполагается, что высокочастотные колебания ПКО вызваны высокочастотными гармониками УФ-Б и переносом озона из верхнего активного слоя атмосферы в приземный слой динамическими процессами синоптического масштаба с характерным временем около 3 дней. Смещение по частоте максимума спектральной плотности ПКО от максимума спектра интенсивности УФ-Б в низкочастотной области связано с инерционными фотохимическими процессами в приземном слое атмосферы.

На основе фотохимического баланса концентрации озона получены математическая модель среднедневных вариаций ПКО от температуры воздуха и

вариаций концентрации оксидов азота в условиях застоя воздуха. Условию застоя способствовали жаркое лето с максимальной среднечасовой температурой воздуха до 38° С и частые лесные пожары, усиливающие генерацию и накопление озона в приземном слое атмосферы.

Зависимость этих параметров меняется во времени с характерным периодом до 3 дней. Применяя эти модели можно проводить приближенную оценку образования озона в период застоя воздуха, и краткосрочный прогноз его концентрации.

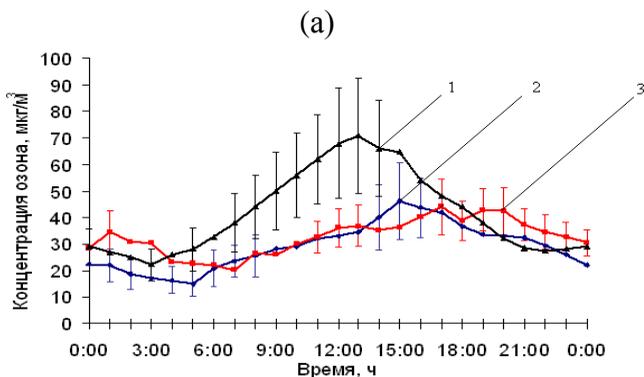
Таким образом, аномалии ПКО в Улан-Удэ за весь период обусловлены динамическими и фотохимическими причинами и носят кратковременный характер. Основной вклад в формирование годового хода ПКО вносят крупномасштабные и синоптические процессы.

**В четвертой главе** рассматриваются результаты регулярных летних наблюдений ПКО и концентрации оксидов азота в юго-восточной части оз. Байкал в летний период.

Анализируются особенности пространственно-временных вариаций концентраций озона на побережье и в приземном слое атмосферы Байкала.

На рис. 9 показаны результаты измерений суточных вариаций концентраций озона, диоксида азота и относительной влажности воздуха в различных условиях наблюдения.

Суточный ход концентрации озона на побережье Байкала (кривая 2, рис.9 а) в летний период имеет черты, характерные для прибрежных районов в условиях слабого загрязнения: утренний не очень глубокий минимум и относительно поздний послеполуденный дневной максимум. Случаются резкие увеличения концентрации в первой половине дня. Средний за все периоды наблюдения суточный ход имеет амплитуду, равную 30 мкг/м<sup>3</sup>. Для сравнения в суточном ходе в городских условиях разница между минимумом и максимумом составляет до 50 мкг/м<sup>3</sup> (кривая 1, рис. 9 а).



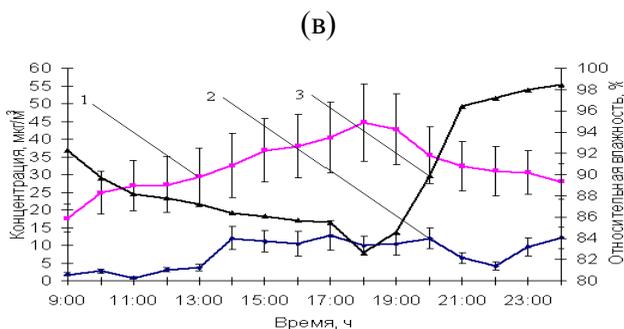
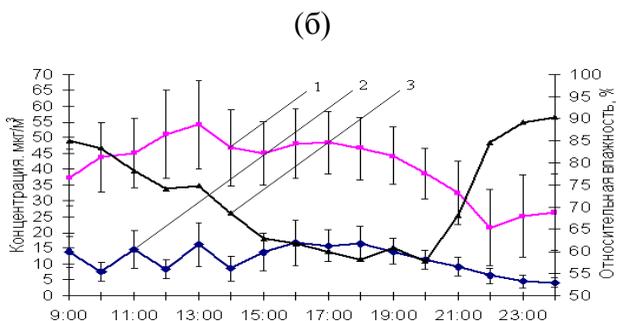


Рис. 9. Суточный ход концентрации озона, диоксида азота, влажности воздуха: (а) - кривые 1, 2, 3 для г. Улан-Удэ, побережья Байкала, приводного слоя атмосферы, соответственно; (б), (в) - кривые 1, 2, 3 для ПКО, концентрации диоксида азота и относительной влажности воздуха, соответственно, на побережье Байкала.

По типу погодных условий на побережье Байкала были выявлены 2 режима внутрисуточной изменчивости приземного озона. Первый режим, с главным максимумом во второй половине дня в 13:00 ч, минимумом в вечерние часы (кривая 1 на рис. 9 б) и второй режим, с более поздним максимумом в 18:00 ч и минимумом в утренние часы (кривая 1, рис. 9 в). Из всего массива данных (169 совместных дней наблюдений) было зафиксировано 70 дней, в течение которых суточный ход ПКО имел отчетливый максимум днем, в 13:00 ч.

Для первого режима характерным является малооблачный конвективный тип погоды со слабоустойчивой стратификацией с параметром  $-0,07 \leq Ri \leq 0$ . В этих условиях происходит интенсивный турбулентный перенос озона с верхней границы слоя перемешивания (1000-1200 м), и к 13:00 ч местного времени быстро наступает максимум ПКО.

Другим механизмом формирования максимума является фотохимия. В разделе 4.1.2 подробно описан механизм образования озона при взаимодействии с диоксидом азота в условиях инсоляции и изменчивости относительной влажности воздуха.

По методу СФР (состояние фотохимического равновесия) определена скорость образования озона и оценена суммарная концентрация перокси и углеводородных радикалов  $[\text{HO}_2 + \text{RO}_2]$ .

В условиях высокой влажности и интенсивности выделения летучих органических соединений лесными массивами на побережье Байкала вклад  $[\text{HO}_2 + \text{RO}_2]$  в генерацию озона в этом режиме значителен. Суточный ход скорости образования  $d[\text{O}_3]/dt$  с максимумом в 11 ч подтверждает о реальной возможности фотохимической генерации озона со скоростью  $11,5 \text{ мкг/м}^3$  в час. Также установлена количественная оценка зависимости межсуточных приращений озона от интенсивности суммарной солнечной радиации, отличающаяся большой нелинейностью значений их параметров. Показано, что на образование  $1 \text{ мкг/м}^3$  озона расходуется от 37 до  $280 \text{ Вт/м}^2\text{ч}$ .

Часто встречающийся 2 режим суточного хода ПКО (в 48 случаях за весь период наблюдения, рис. 9 в) характеризуется более медленным и поздним наступлением максимума в 18:00 ч по сравнению с режимом 1. В условиях неустойчивой и сильно неустойчивой стратификации приземного слоя атмосферы с параметром  $-0,7 \leq Ri \leq -0,2$ , в отсутствие фотохимических процессов образования озона, величина максимума ПКО во 2 режиме меньше на  $10 \text{ мкг/м}^3$  величины максимума концентрации озона в 1 режиме. Скорость увеличения ПКО во времени не высока по сравнению с 1 режимом, так как на каплях воды в результате гетерогенных процессов происходит частичное разрушение озона, кроме этого в отсутствие фотохимических процессов взаимодействия с газами предшественниками не происходит дополнительного образования озона.

В разделе 4.1.3 рассмотрены особенности поведения суточного хода ПКО при прохождении над пунктом наблюдения холодных фронтов. Установлено, что в суточном ходе максимум ПКО после прохождения атмосферного фронта меньше на  $15 \text{ мкг/м}^3$ , чем до его прохождения. Причем время установления максимального значения концентрации озона после прохождения фронта отстает на 3 часа относительно времени до прохождения ХФ над пунктом наблюдения.

Существенную роль в изменении ПКО играет температура воздуха, которая испытывала значительное понижение после прохождения фронта, и явилась основной причиной более позднего развития конвективного турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы. Лишь во второй половине дня в 16:00 ч местного времени была зарегистрирована максимальная дневная температура, равная  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , которая явилась причиной более интенсивного вертикального турбулентного переноса озона с верхней границы слоя перемешивания, где его содержания значительно больше, чем в приземном слое.

В разделе 4.1.4 приведены результаты измерения вертикального распределения температуры и концентрации озона в приземном слое атмосферы до высоты 12 м. Были получены 3 типа стратификации. Интерпретируются механизмы их формирования и влияние на вертикальное распределение озона.

В дневное время концентрация озона на высоте 10 м в силу значительного турбулентного перемешивания (неустойчивая стратификация) выше более чем в 2 раза ПКО при других типах стратификации. В случае инверсии показано, что “запирающие” слои в атмосфере побережья Байкала играют существенную роль в накоплении озона в этом слое.

В разделе 4.2 приведены впервые результаты и методика маршрутных измерений концентраций  $[O_3]$ ,  $[NO]$ ,  $[NO_2]$  в приводном слое атмосферы над Байкалом и анализируются особенности пространственной и временной изменчивости озона и окислов азота.

На рис.10 приведены вариации газовых примесей, температуры и скорости ветра в приводном слое по всей акватории оз. Байкал.

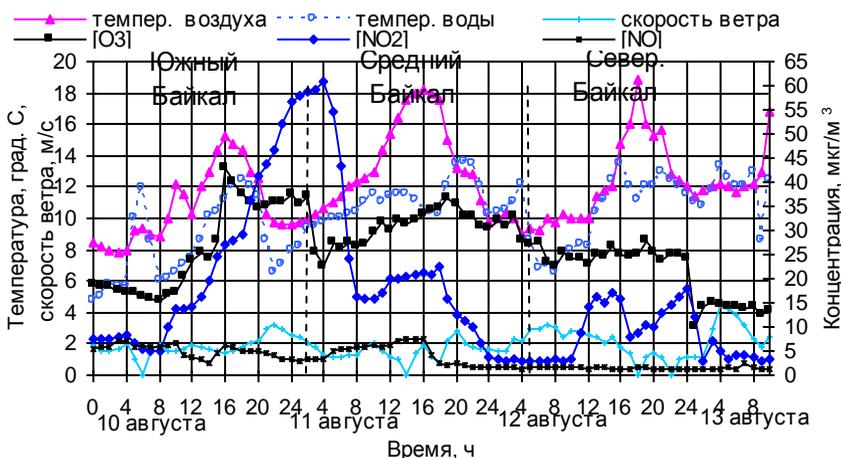


Рис. 10. Пространственно-временные вариации озона, оксидов азота и метеопараметров в приводном слое атмосферы оз. Байкал.

Из рисунка видно, что распределение характеристик отличается существенной неоднородностью в пространстве и во времени. Почти все наблюдавшиеся вариации концентрации газовых примесей по линии маршрута отражают характерные особенности воздействия мезомасштабных динамических и локальных конвективных процессов на распределение газовых примесей в атмосфере оз. Байкал.

**В Южном Байкале** наблюдаемые вариации озона в дневных условиях являются результатом воздействия вертикального турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы.

Установленный максимум  $[O_3]$  в послеполуденное время соответствует максимальной высоте слоя перемешивания равной 1800 м [Балин Ю.С., Ершов А.Д., 2000]. Ночные непродолжительные вариации озона обусловлены местными циркуляциями (бризовая, внутрикотловинная).

Фотохимические процессы не играют существенную роль в дополнительном образовании озона за выполненный период измерения, но обнаруженный локальный максимум концентрации диоксида азота вблизи природного источника загрязнения (выделение метана) может свидетельствовать о возможной фотохимической генерации озона в дневное время.

**В Среднем Байкале** за счет слабо развитого вертикального турбулентного обмена в ПСА распределение озона в пункте измерения более равномерное, с максимумом в вечернее время. При низких значениях концентрации оксидов азота фотохимические процессы не воспроизводят озон.

**В Северном Байкале** установленные невысокие значения концентрации газовых примесей, вероятно, отражают общий региональный фон для этой зоны акватории Байкала. В силу малоизученности этого района, исследование механизмов распределения газовых примесей в Северном Байкале является актуальным.

В последнем разделе главы приведена оценка вертикальных потоков озона в приземном слое атмосферы и скорость сухого осаждения на водную поверхность Байкала, которая меняется в пределах от 0,12 см/с до 0,4 см/с, и согласуется с оценками, сделанными по наблюдениям над озерной и морской поверхностью в условиях устойчивой и слабоустойчивой стратификации [12-15].

#### **В заключении приведены основные результаты работы:**

1. Создан измерительно-вычислительный комплекс для регистрации характеристик пространственно-временных вариаций приземного озона, оксидов азота. Проведены измерения ПКО, концентраций оксидов азота и метеопараметров в г. Улан-Удэ и на юго-восточном побережье оз. Байкала за шестилетний период.

2. Выявлены сезонные и суточные вариации ПКО в г. Улан-Удэ. Характерной особенностью сезонных вариаций является наличие максимума – в июне и минимума - в декабре и январе. Среднесуточные концентрации озона меняются от 15 до 80 мкг/м<sup>3</sup>. Среднегодовая суточная изменчивость ПКО с максимумами в 0:00 и 13:00 ч и двумя минимумами в 3:00 и 21:00 ч местного времени близка к фоновой и не превышает предельно-допустимой концентрации.

3. В годовом ходе ПКО и общего содержания озона (ОСО) установлена квазипериодическая структура их вариаций, причем максимумы ПКО отстают от максимумов ОСО в среднем на 3 месяца (максимум ОСО достигается в марте, а максимум ПКО - в июне). Выявлены квазидвухлетние колебания ОСО и ПКО в весенний период.

4. В условиях летнего застоя воздуха обнаружен квазипериодический характер увеличения среднедневных ПКО, концентрации диоксида азота и температуры воздуха. Предложена математическая модель зависимости ПКО от концентраций оксидов азота и температуры воздуха. Выявлено смещение максимума спектральной плотности ПКО от максимума УФ-Б на период в 20

дней и в области высоких частот на период до одного дня.

5. По наблюдениям в летний период на побережье Байкала выявлены 2 режима суточного хода ПКО - с максимумом в 13:00 ч, минимумом в ночные часы и с более поздним максимумом в 18:00 ч и минимумом в утренние часы. Среднесуточные значения концентрации озона на побережье оз. Байкал в условиях неустойчивой атмосферы в 1,5 раза меньше, чем в городских условиях, а максимум ПКО отстает от максимума концентрации озона в г. Улан-Удэ на 3 часа.

6. Выявлена пространственно-временная неоднородность концентраций озона, оксидов азота в приземном слое атмосферы оз. Байкал. В Южном Байкале максимум концентрации озона в послеполуденное время соответствует максимальной высоте слоя перемешивания. В Среднем Байкале основной вклад в формирование вечернего максимума ПКО вносит адвекция воздушных масс с прибрежной зоны. Обнаружен локальный максимум концентрации диоксида азота вблизи природного источника метана. Оценена скорость сухого осаждения озона на водную поверхность Байкала, которая меняется в пределах от 0,0019 до 0,096 см/с.

### Список литературы

1. S.J.Oltmans, A.S.Lefohn, H.E.Schell, J.M. Harris, H. Levy II, I.E. Galbally, E.-G. Brunke, C.P. Meyer, J.A.Lathrop, B.J. Johnson, D.S. Shadwick, E. Guevas, F.J. Schmidlin, D.W. Tarasick, H. Claude, J.B. Kerr, O. Uchino, V. Mochner. Trends of ozone in the troposphere // J. Geophys. Res. 1998. V. 25. № 2. P. 139-142.
2. Pochanart P., Acimoto H., Maksyutov S., Staehelin J. Surface ozone at the Swiss Alpine site Arosa: the hemispheric background and the influence of large-scale anthropogenic emissions. // Atmos. Environmental, V.35, P.5553-5566, 2001.
3. Akimoto, H., Narita, H. Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1<sup>0</sup> x 1<sup>0</sup> resolution. // Atmospheric Environment 28, 213-225, 1994.
4. Израэль Ю.А. др. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих атмосферу веществ. // Л., Гидрометеиздат, 1987. 322 с.
5. Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Фотохимическая генерация озона в шлейфах антропогенных выбросов над Хабаровским краем. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2005, т. 41, № 4, с. 511-519.
6. Климат Улан-Удэ. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
7. Балин Ю.С., Ершов А.Д. Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозольных полей атмосферы в котловине оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 13. № 6-7. С. 633-638.
8. Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дандаров В.А. Автоматизированная система регистрации и обработки результатов измерений концентрации газовых примесей // 4 Сибирское совещание по климатологии

экологическому мониторингу: Тезисы докладов. Томск, 2001. С. 99.

9. Дандаров В.А. Программа автоматизации непрерывных измерений и регистрации содержания газовых примесей в приземном слое атмосферы. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 200611005 (Роспатент). Улан-Удэ, 2000.

10. [ftp://toms.gsfe.nasa.gov/pub/eptoms/data/monthly\\_averages/ozone](ftp://toms.gsfe.nasa.gov/pub/eptoms/data/monthly_averages/ozone).

11. [ftp://toms.gsfe.nasa.gov/pub/eptoms/data/monthly\\_averages/uv](ftp://toms.gsfe.nasa.gov/pub/eptoms/data/monthly_averages/uv).

12. L. Aldaz, Flux measurements of atmospheric ozone over land and water. *Journal of Geophysical Research* **74** (1969), pp. 6943–6946.

13. J.A. Garland, A.W. Elzerman and S.A. Penkett, The mechanism for dry deposition of ozone to seawater surface. *Journal of Geophysical Research* **85** (1980), pp. 7488–7492.

14. D. Lenschow, R. Pearson and B. Stankov, Measurements of ozone vertical flux to ocean and forest. *Journal of Geophysical Research* **87** (1982), pp. 8833–8837.

15. Wonil Chang, Brian G. Heikes and Meehye Lee, Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and wind speed dependence. *Atmospheric Environment Volume 38, Issue 7, March 2004, Pages 1053-1059*

#### **По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Бутуханов В.П. Исследование динамики загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы и окисью углерода в г. Улан-Удэ / Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л., Баранников Г.Е., Бутуханов В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 202-206.

2. Бутуханов В.П. Мониторинг газового состава атмосферного воздуха в г. Улан-Удэ / Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П., Баранников Г.Е., Ломухин Ю.Л.// IV Заседание Рабочей группы «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов – Томск, 1997.- С. 67.

3. Бутуханов В.П. Изучение вариаций приземной концентрации озона и аэрозоля в атмосфере прибрежной зоны озера Байкал / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л. // V Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов – Томск, 1998. – С. 47-48.

4. Бутуханов В.П. Измерение приземной концентрации газовых примесей в г. Улан-Удэ / Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Ломухин Ю.Л., Бутуханов В.П., Баранников Г.Е.// Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 740-743.

5. Бутуханов В.П. Исследование вариаций приземной концентрации озона и окиси углерода в Байкальском регионе / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л. // Третье Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов – Томск, 1999. – С. 49-50.

6. Бутуханов В.П. Особенности распределения скорости и направле-

ния ветра в юго-восточной части побережья оз. Байкал / Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П., Балтухаев А.К. // Третье Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов – Томск, 1999. – С. 20.

7. Бутуханов В.П. Измерение приземной концентрации озона и окислов азота в атмосфере Южного побережья оз. Байкал / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л. // VI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов – Томск, 1999. – С. 123.

8. Бутуханов В.П. Сезонные вариации приземной концентрации озона в атмосфере Байкальского региона / Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П., Ломухин Ю.Л. // Третья Верещагинская Байкальская конференция: Тезисы докладов – Иркутск, 2000. – С. 88-89.

9. Бутуханов В.П. Особенности сезонной изменчивости приземной концентрации озона в атмосфере Байкальского региона / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л. // VII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докладов – Томск, 2000. – С. 143.

10. V.P. Butukhanov. Features of distribution of ground level concentrations of ozone and nitrogen oxides under photochemical processes in the Baikal region / V.P. Butukhanov, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, Yu.L. Lomukhin, B.Z. Tzydyrov // Proc. of VIII Joint International symposium “Atmospheric and Ocean optics. Atmospheric physics”. – Irkutsk, 2001. - P. 192.

11. Butukhanov, V.P. Surface Ozone Concentration in the Atmosphere over the Lake Baikal Region /, Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Lomukhin Yu.L. // Izv. Atmospheric and Oceanic Phys, 2001, Vol. 37, suppl. 1, pp. S49-S57.

12. Butukhanov, Vasily P. Ground level concentration of ozone in the atmosphere of the Baikal region / Butukhanov Vasily P., Zhamsueva Galina S., Zayakhanov Alexander S., Tzydyrov Bair Z., Lomukhin Yuri L. // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4678. – P. 406-414.

13. Бутуханов В.П. Автоматизированная система регистрации и обработки результатов измерений концентрации газовых примесей / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дандаров В.А. // 4 Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов. Томск, 2001. С. 99.

14. Бутуханов В.П. Пространственно-временное распределение приземного аэрозоля в Байкальском регионе / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ходжер Т.В., Ломухин Ю.Л. // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 6-7. – С. 564-568.

15. Бутуханов В.П. Особенности распределения приземных концентраций озона и окислов азота при фотохимических процессах в Байкальском регионе / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л., Цыдыпов Б.З. // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 7. – С. 604-607.

16. Butukhanov, V.P Seasonal variations of surface ozone concentrations in

the Baikal region / Butukhanov V.P, Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Lomukhin Yu.L., Tzydypov B.Z. // International Workshop "Tropospheric Ozone Research – 2". – Moscow, 2002. – P. 10.

17. Бутуханов, В.П. Вертикальное распределение концентрации озона и температуры в приземном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал / Бутуханов, В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л., Цыдыпов Б.З. // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 2. – С. 131-133.

18. Бутуханов В.П. Исследование формирования особенностей распределения скорости и направления ветра в юго-восточной части побережья оз. Байкал/ Балтухаев А.К., Бутуханов В.П., Цыдыпов Б.З. (ст. Танхой) // Сб. статей III международной школы молодых ученых и специалистов "Физика окружающей среды". – Томск, 2002. – С. 125–129.

19. Бутуханов В.П. Пространственная изменчивость малых газовых составляющих в атмосфере акватории оз. Байкал / Бутуханов, В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Цыдыпов Б.З., Цыдыпов В.В. // X Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов – Томск, 2003. – С.22.

20. Butukhanov, V.P. Study of distribution features of gaseous and aerosol components in Baikal region atmosphere / Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Butukhanov V.P., Tzydypov B.Z., Tzydypov V.V. // Proc. of X Joint International symposium "Atmospheric and Ocean optics. Atmospheric physics". – Tomsk, 2003. – P. 114-115.

21. Butukhanov, V.P. The analysis of spatial distribution of small gaseous impurities of Lake Baikal atmosphere / Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Butukhanov V.P., Tzydypov B.Z., Tzydypov V.V. // Proc. of XI Joint International symposium "Atmospheric and Ocean optics. Atmospheric physics". – Tomsk, 2004. – P. 127-128.

22. Бутуханов В.П. Связь концентрации озона с концентрацией окислов азота и температурой воздуха в приземном слое атмосферы г. Улан-Удэ / Бутуханов В.П., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ломухин Ю.Л. и др. // Метеорология и гидрология. 2005. № 10. С. 21-32.

23. Бутуханов В.П. Концентрация озона и окислов азота в приземном слое атмосферы озера Байкал / Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Бутуханов В.П., Ломухин Ю.Л. // Оптика атмосферы и океана. –2006. – Т. 19, № 7. – С. 635-640.

24. Бутуханов В.П. Экспериментальные и модельные исследования пространственного распределения атмосферного аэрозоля над акваторией оз. Байкал /Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э., Макухин В.Л., Маринайта И.И., Потемкин В.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П. //Оптика атмосферы и океана, 2007. Т. 20. N 2. С. 114-121.

25. Бутуханов, В.П., Ломухин Ю.Л. Вариации приземной концентрации озона в атмосфере г. Улан-Удэ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 4. С.503-509.