

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Институт леса им. В.Н. Сукачева  
Сибирского отделения Российской академии наук-  
- обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

*На правах рукописи*

*Тимохина*

ТИМОХИНА Анастасия Владимировна

**Динамика концентрации атмосферного диоксида углерода над  
среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири  
(по данным измерений на обсерватории “ZOTTO”)**

Специальность 03.02.08 – Экология  
(биологические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата биологических наук

*Научный руководитель:*  
Доктор биологических наук А.А. Онучин

Красноярск – 2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СТЕПЕНЬ ИССЛЕДОВАННОСТИ СОСТОЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА .....	9
1.1. Диоксид углерода атмосферы .....	9
1.2. Причины роста концентрации CO <sub>2</sub> в атмосфере .....	12
1.3. Роль бореальных лесов в динамике концентрации CO <sub>2</sub> .....	16
1.4. Измерения концентрации CO <sub>2</sub> на высотных мачтах.....	18
1.5. Наблюдения за концентрацией CO <sub>2</sub> на территории РФ .....	21
1.6. Международная обсерватория “ZOTTO” .....	23
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ, СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДА АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO <sub>2</sub> .....	26
2.1. Характеристика района исследования .....	26
2.1.1. Геоморфологическое описание.....	26
2.1.2. Климат .....	28
2.1.3. Растительные условия.....	32
2.2. Системы измерения концентрации атмосферного CO <sub>2</sub> и метеорологических параметров .....	32
2.2.1. Метеорологическое оборудование .....	33
2.2.2. Газоаналитический комплекс EnviroSense 3000i.....	35
2.2.2.1. Система подачи воздуха .....	35
2.2.2.2. Принцип функционирования газоанализатора EnviroSense 3000i.....	39
2.2.2.4. Коррекция первичных измерений концентрации CO <sub>2</sub> .....	40
2.2.2.5. Система регистрации измерений концентрации CO <sub>2</sub> .....	41
2.2.3. Система отбора проб воздуха в стеклянные емкости .....	42
2.3. Методы анализа концентрации атмосферного CO <sub>2</sub> .....	43
2.3.1. Определение временного ряда.....	43
2.3.2. Разложение временного ряда концентрации атмосферного CO <sub>2</sub> .....	49

ГЛАВА 3. ВЫЯВЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (ФУТПРИНТА), ОКАЗЫВАЮЩЕЙ ВЛИЯНИЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ CO <sub>2</sub> , ИЗМЕРЯЕМУЮ НА ВЫСОТНОЙ МАЧТЕ ОБСЕРВАТОРИИ “ZOTTO” .....	54
3.1. Описание стохастической транспортной модели STILT .....	55
3.2. Сезонный футпринт .....	57
3.3. Заключение к главе 3 .....	65
ГЛАВА 4. СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO <sub>2</sub> .....	67
4.1. Вертикальное распределение концентрации CO <sub>2</sub> .....	67
4.2. Оценка суммарной эмиссии CO <sub>2</sub> из наземных экосистем .....	76
4.3. Заключение к главе 4 .....	90
ГЛАВА 5. ГОДОВАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ.....	92
АТМОСФЕРНОГО CO <sub>2</sub> .....	92
5.1. Количественная характеристика годовой динамики концентрации атмосферного CO <sub>2</sub> .....	94
5.2. Межгодовая изменчивость годового хода концентрации атмосферного CO <sub>2</sub> .....	110
5.3. Особенности годовой динамика концентраций CO <sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири по сравнению с Северной Атлантикой и бореальным поясом Северной Америки.....	115
5.4. Заключение к главе 5 .....	120
ГЛАВА 6. РОСТ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO <sub>2</sub> НАД СРЕДНЕТАЕЖНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ ПРИЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ ..	122
6.1. Среднемноголетняя тенденция увеличения концентрации CO <sub>2</sub> .....	122
6.2. Межгодовая вариабельность скорости роста концентрации CO <sub>2</sub> .....	131
6.3. Заключение к главе 6 .....	136
ВЫВОДЫ.....	138
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ .....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Диоксид углерода является основным углеродсодержащим парниковым газом (ПГ) атмосферы, чье содержание неуклонно растет с начала промышленной революции (Keeling et al., 1976; Joos and Spahni, 2008; Prather et al., 2012; Graven et al., 2013). За последние 60 лет инструментального наблюдения концентрация  $\text{CO}_2$  увеличилась более чем на 25%, достигнув в 2015 году критической отметки в  $400.83 \text{ млн}^{-1}$  (Betts et al., 2016; Бюллетень ВМО № 10, 2016). За последние 10 лет скорость роста  $\text{CO}_2$  в среднем составила  $2.28 \text{ млн}^{-1}$  в год, а отдельно в 2016 году был зафиксирован новый абсолютный рекорд –  $3.36 \text{ млн}^{-1}$  (Dlugokencky and Tans, 2017). Научное сообщество предполагает, что именно угрожающе быстрое поступление диоксида углерода в атмосферу стало главной причиной глобального потепления климата планеты на  $0.85^\circ \text{ C}$  относительно доиндустриального периода (Hartmann et al., 2013). Вместе с тем одновременный рост температуры воздуха и концентрации  $\text{CO}_2$  могут существенно изменить силу природных стоков и источников атмосферного углерода. Понимание этого факта вызвало огромный интерес ученых и политиков разных стран к наблюдению за содержанием  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Сибирские экосистемы, которые занимают более 40% бореального пояса (Лесные экосистемы ..., 2002; Schulze et al., 2002; Svidenko, 2011), в отдельные годы функционируют как самый мощный поглотитель атмосферного  $\text{CO}_2$  среди лесов всего биома (Pan et al., 2011). При этом эти биогеоценозы являются наиболее уязвимыми в контексте наблюдаемого потепления климата (Hartmann et al., 2013), поскольку рост температуры воздуха усиливает гетеротрофное дыхание и эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы (Piao et al. 2008; Schurr et al., 2015). Дополнительное поступления  $\text{CO}_2$  может уравновесить сток атмосферного  $\text{CO}_2$  с его источниками, поэтому необходимы длительные исследования в этом регионе.

В последние 20 лет было реализовано несколько исследовательских программ в рамках различных научных проектов, направленных на изучение углеродного бюджета наземных биогеоценозов Сибири и мониторинг концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (Лесные экосистемы ..., 2002; Lloyd et al., 2002; Аршинов и др., 2009; Sasakawa et al., 2013). Тем не менее, в большей части из них не удалось получить многолетние непрерывные систематические измерения концентраций ПГ, за исключением некоторых станций региональной сети “JR-STATION” (Аршинов и др., 2009; Аршинов и др., 2012; Sasakawa et al., 2013). При этом именно продолжительные частые наблюдения высокого разрешения за содержанием  $\text{CO}_2$  в Сибири позволяют повысить точность математических расчетов и определить сток атмосферного  $\text{CO}_2$  и его изменчивость (Saeki et al., 2013; Kim et al., 2017). С целью длительного мониторинга атмосферы над центральной частью Сибири в 2006 году вступила в действие международная обсерватория **Zotino Tall Tower Observatory** (“ZOTTO”), где градиентные измерения концентрации  $\text{CO}_2$  осуществляется с помощью 301-м мачты.

Для Сибири, как и России в целом, плохо представлена количественная характеристика временной динамики концентрации  $\text{CO}_2$  и скорости ее роста, что определило актуальность данной работы.

**Цель работы** заключалась в выявлении особенностей изменчивости концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на различных временных масштабах над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири по данным измерений на обсерватории “ZOTTO”.

**Задачи исследования:**

1. Выявить площадь подстилающей поверхности (футпринта), оказывающей влияние на концентрацию  $\text{CO}_2$  в атмосфере, измеряемую на мачте обсерватории “ZOTTO” (для высоты 301 м).

2. Определить сезонные особенности суточной динамики концентрации  $\text{CO}_2$  на профиле высот до 301 м. Оценить возможность использования градиентных измерений содержания  $\text{CO}_2$  и метеорологических

параметров для расчета суммарной эмиссии CO<sub>2</sub> из наземных экосистем, составляющих футпринт для измерений на мачте обсерватории “ZOTTO”.

3. Описать годовую динамику содержания атмосферного CO<sub>2</sub> и выявить ее специфику по сравнению с бореальным поясом Северной Америки.

4. Определить скорость годового роста и временную тенденцию увеличения концентрации CO<sub>2</sub>.

#### **Основные положения выносимые на защиту:**

1. Специфика распределения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири определяется географическим положением района вне значимого влияния морского климата.

2. Скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири соответствует глобальному значению, однако характеризуется высокими межгодовыми флуктуациями, свойственным всему бореальному поясу.

**Научная новизна** Впервые для территории Сибири получена детальная количественная характеристика концентраций атмосферного CO<sub>2</sub> на разных временных масштабах: от суточного до многолетнего, с использованием непрерывных систематических точных инструментальных измерений высокого разрешения и точности по вертикальному градиенту приземной атмосферы с применением высотной мачты (301 м). Впервые показано, что скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в Сибири характеризуется высокой межгодовой изменчивостью.

**Практическая значимость** Измерения концентрации CO<sub>2</sub>, проводимые на 301-м высотной мачте, характеризуют огромную территорию (около 7000000 км<sup>2</sup> в дневной период летнего сезона), что имеет колоссальное значение для нашей страны, где государственная система мониторинга атмосферы не развита в достаточной мере. Именно результаты длительных непрерывных наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub> на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”, которые представлены в работе, составят основу надежных математических расчетов поглощения углерода биогеоценозами, составляющими значительную часть

Сибири. Последнее имеет особую значимость, поскольку определения поглотительной способности российских лесов является приоритетной задачей правительства РФ на 2017 г.

**Личный вклад автора** Автор в течение 6 лет регулярно (несколько раз в год) посещала обсерваторию “ZOTTO” с целью технического контроля приборной базы, поэтому хорошо знакома с особенностями её работы и процедурой получения данных по содержанию атмосферного CO<sub>2</sub>. Все исследования по теме диссертации осуществлялись автором лично, в том числе статистический анализ, расчеты, интерпретация результатов и публикация полученных материалов. Часть результатов, касаемая оценки футпринта измерений, получаемых на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” и выявления вклада различных типов растительности, получена при совместной работе с Т. Кохом, К. Гербигом и М.А. Корецом.

**Апробация работы** Основные положения диссертационной работы были представлены на конференции молодых ученых Института леса СО РАН «Исследования компонентов лесных экосистем Сибири» (Красноярск, 2010, 2011, 2012, 2014, 2016), конференции молодых ученых Красноярского научного центра (Красноярск, 2011, 2012), международной конференции «Бореальные леса в изменяющемся мире», IBFRA, (Красноярск, 2011), международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды “Enviromis” (Иркутск, 2012; Томск, 2016), международном совещании по изменению климата (Красноярск, 2012), международном рабочем совещании «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на Восточную Евразию» (Якутск, 2013, 2016), международном рабочем семинаре обсерватории “ZOTTO” «Отклик экосистем северной Евразии на глобальное изменение климата: от наблюдения к прогнозированию» (Красноярск, 2013), всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 70-летию создания Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Красноярск, 2014), международной школе-конференции молодых ученых

«Изменение климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (Кисловодск, 2014).

**Публикации.** Основные положения диссертации прошли апробацию на 16 научных конференциях, и опубликованы в 20 работах, в том числе 6 статьях журналов, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов и перечня сокращений. Текст работы изложен на 165 страницах, иллюстрирован 15 таблицами и 45 рисунками. Список использованной литературы содержит 196 источников, из которых 141 работа на английском языке.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.б.н. А.А. Онучину. За ценные консультации, советы при подготовке публикаций и содействие в работе автор глубоко признателен к.б.н. А.С. Прокушкину. Автор благодарит к.ф.-м.н. Г.Б. Кофмана и к.ф.-м.н. А.В. Шашкина за консультирование в процессе статистической обработки данных, д.б.н. Э.Ф. Ведрову, к.т.н. М.А. Кореца, а также немецких коллег: проф. М. Хаймана, Й. В. Лаврича, К. Гербига, Т. Коха, К. Кюблера и Ш. Шмидта, и сотрудников обсерватории “ZOTTO” за техническое обеспечение исследований.



# ГЛАВА 1. СТЕПЕНЬ ИССЛЕДОВАННОСТИ СОСТОЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

## 1.1. Диоксид углерода атмосферы

Согласно существующим оценкам в атмосфере Земли в настоящее время сосредоточено 828 Гт С или 1.7% всех запасов углерода на планете (таблица 1.1). Вместе с тем в глобальном цикле углерода атмосферный углерод представляет собой наиболее динамичный компонент, характеризующийся как краткосрочными, так и долгосрочными изменениями под влиянием природных биогеохимических процессов и деятельности человека (Ciais et al., 2013).

Диоксид углерода представляет собой основную (>>99%) фракцию углерода атмосферы, которая при этом играет ключевую роль в регулировании приповерхностной температуры планеты. CO<sub>2</sub> вместе с водяным паром, метаном и закисью азота участвует в радиационном или климатическом воздействии (“climate/radiative forcing”, RF). При условии исключения водяного пара, на который приходится 95% суммарного парникового эффекта (таблица 1.2) (Global Warming: A closer look at the numbers), CO<sub>2</sub> имеет максимальный среди прочих ПГ вклад в усиление радиационного воздействия – около 65% в 2011 г. Исходя из его текущей концентрации в атмосфере (2016 г.: 400 млн<sup>-1</sup>), RF CO<sub>2</sub> ( $\Delta RF = 5.35 \cdot \ln(C/C_0)$ ), где C – концентрация в 2016 г. и C<sub>0</sub> – в 1750 г.) составляет 1.95 Вт/м<sup>2</sup>, что выше приводимых значений для 2011 г. (1.82 Вт/м<sup>2</sup>) (Myhre et al., 1998; Myhre et al., 2013).

Существующие реконструкции концентраций CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли свидетельствуют об их значительной вариации в прошлые геологические эпохи: от 180 млн<sup>-1</sup> при периодических оледенениях Четвертичного периода (0 – 1.8 млн. лет назад) до более чем 7000 млн<sup>-1</sup> в Кембрийский период (около 500 млн. лет назад). За последние 400 тыс. лет, согласно анализам ледовых кернов Антарктиды (станция “Восток”), содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере менялось

циклически с периодом около 100 тыс. лет (Petit et al., 1999; Joos and Spahni, 2008). Наименьшие концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (180 – 210 млн<sup>-1</sup>) были характерны ледниковым периодам (например, около 25, 150, 250 и 350 тыс. лет назад), а максимальные (280-300 млн<sup>-1</sup>) отмечались в межледниковья (настоящее время и около 120, 240, 320 и 400 тыс. лет назад) (рисунок 1.1).

Таблица 1.1 – Распределение  $\text{CO}_2$  в основных компонентах глобального цикла углерода\*

Компонент	Количество углерода, Гт С
Атмосфера	828
Наземная растительность	450-650
Почва	2400
Криолитозона	1700
Океан	40453
Полезные ископаемые:	637-1575
ИТОГО:	46469-47606

\* цитируется по Ciais et al., 2013.

Таблица 1.2 – Относительный вклад газов в парниковый эффект Земли\*

Название ПГ	Процент от общего содержания	Процент от общего содержания с поправкой на $\text{H}_2\text{O}$
Водяной пар, $\text{H}_2\text{O}$	95.000	
Диоксид углерода, $\text{CO}_2$	3.618	72.369
Метан, $\text{CH}_4$	0.360	7.100
Закись азота, $\text{N}_2\text{O}$	0.950	19.000
Другие газы	0.072	1.432
ИТОГО:	100.000	100.000

\* цитируется по Global Warming: A closer look at the numbers

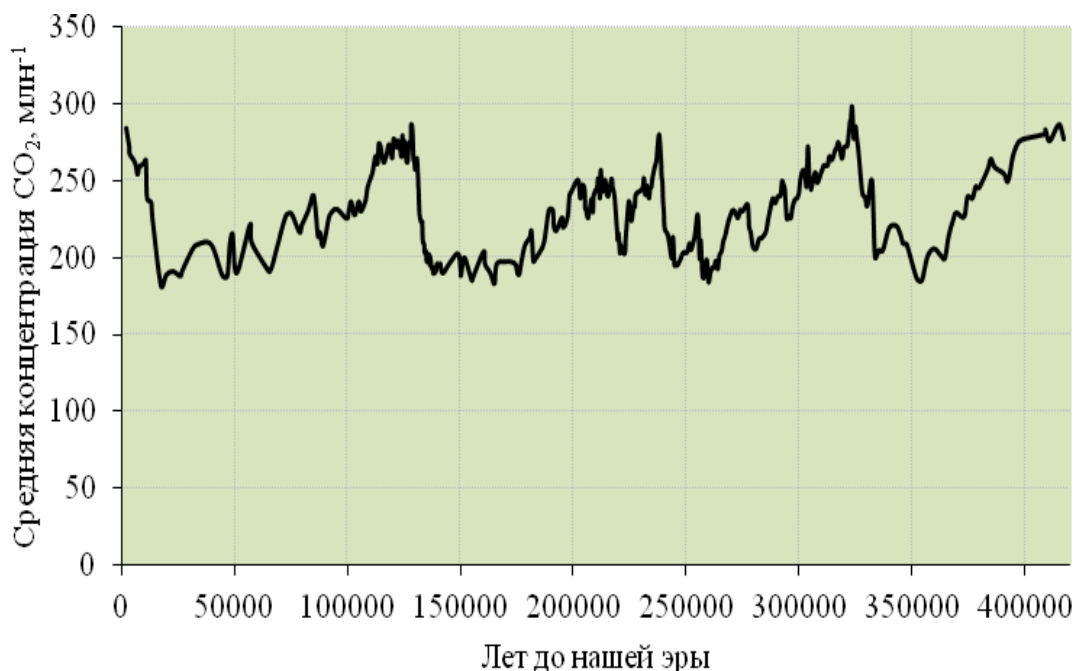


Рисунок 1.1 – Реконструкции концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  за последние 400 тыс. лет по данным ледовых кернов Антарктиды (станция “Восток”,  $78^{\circ}28'$  ю.ш.,  $106^{\circ}48'$  в.д.). Данные предоставлены информационным аналитическим центром по диоксиду углерода (Carbon Dioxide Information Analysis Center).

В мае 2013 года глобальная атмосферная концентрация  $\text{CO}_2$  впервые достигла отметки в  $400 \text{ млн}^{-1}$ , а в 2015 году столько уже составило ее среднегодовое значение (Betts et al., 2016). Современный уровень концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на 44% выше по отношению к доиндустриальному уровню, ( $280 \text{ млн}^{-1}$ ), и более чем на 25% относительно первых высокоточных измерений, предпринятых К. Д. Киллингом на станции “Mauna Loa” (Гавайские острова, США) в 1956 г. (рисунок 1.2) (Keeling et al., 1976). Быстрый рост концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  с начала индустриальной эпохи, которая исчисляется с 1750 г. (Ciais et al., 2013), привел к увеличению атмосферного пула  $\text{CO}_2$  на 41%.

Концентрация атмосферной  $\text{CO}_2$  на станции  
"Mauna Loa"

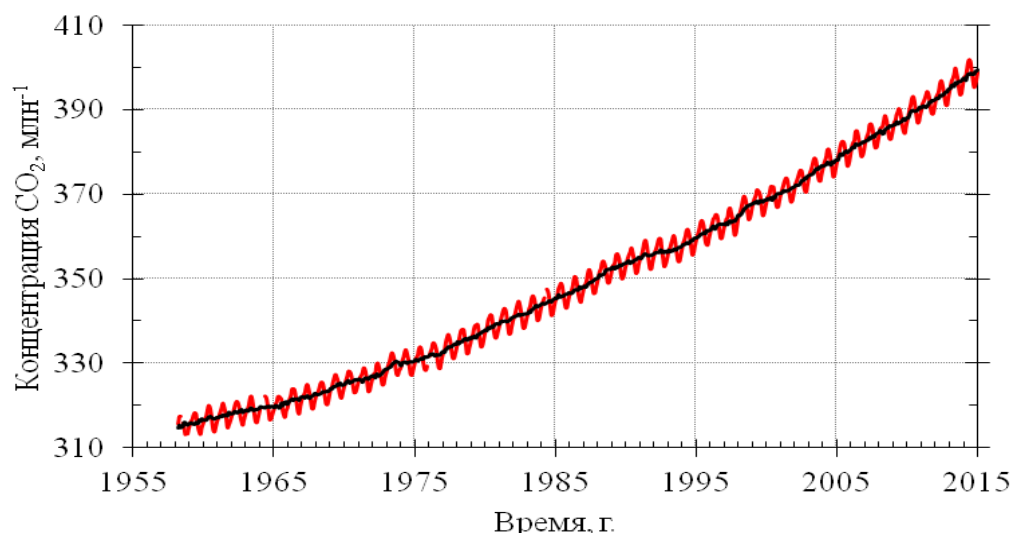


Рисунок 1.2 – Инструментальные измерения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на станции “Mauna Loa”. Данные предоставлены Лабораторией Исследования Земли. Отдел Глобального Мониторинга (Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA).

## 1.2. Причины роста концентрации $\text{CO}_2$ в атмосфере

Изначальными причинами увеличения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  значились сведения лесов, преимущественно тропических, активное ведение лесного хозяйства, изменения в землепользовании (Ciais et al., 2013). На протяжении последнего столетия количество  $\text{CO}_2$ , выделяемого в результате землепользования, практически не изменялось и сохранялось в среднем на уровне  $1.0 \pm 0.5$  Гт С в год. Поступление  $\text{CO}_2$  при сжигании ископаемых видов топлива (угля, газа и нефтепродуктов) и производстве цемента также оказывало существенное влияние на рост концентрации  $\text{CO}_2$  с начала индустриальной эпохи, однако свое лидирующее положение среди антропогенных источников  $\text{CO}_2$  эти факторы стали занимать только с 1920 года, продолжая оставаться на этой позиции по настоящее время. Кроме того, эмиссия  $\text{CO}_2$  от сжигания

топлива постоянно возрастает (Ciais et al., 2013; Le Quere et al., 2016). Так, в 1960-х годах выделение  $\text{CO}_2$  находилось на уровне  $3.1 \pm 0.2$  Гт С в год, а к последнему десятилетию (2006 – 2015 гг.) увеличилось в три раза, составив  $9.3 \pm 0.5$  Гт С в год (Le Quere et al., 2016). В последние годы (2014 – 2016 гг.) рост антропогенного  $\text{CO}_2$  сократился (на 0.06% по сравнению с 1.80% за последние десять лет) (Le Quere et al., 2016; Jakson et al., 2016). Стабилизацию промышленных выбросов  $\text{CO}_2$  связывают с уменьшением поступления  $\text{CO}_2$  (на 1.8%) от сжигания древесного угля, преимущественно Китаем и США, и производства цемента (на 1.9%), а также с падением спроса на нефть и природный газ. Немаловажную роль играет постоянно растущее использование возобновляемых источников энергии (солнечные свет, ветер, приливы и другие), доля которых в 2014 году составила около 19% от мирового энергопотребления. Поступление  $\text{CO}_2$  при сжигании угля и природного газа рассматривается как главный источник антропогенного  $\text{CO}_2$  в атмосфере (41% и 34%, соответственно), следовательно, даже незначительные изменения в потреблении этих ископаемых источников энергии приводят к снижению промышленных выбросов  $\text{CO}_2$ .

Наряду с главными странами - «источниками» антропогенного  $\text{CO}_2$  – Китаем (2.8 Гт С в год) и США (1.4 Гт С в год), которые в 2015 году сократили выбросы  $\text{CO}_2$  на своих территориях на 0.76 и 2.55%, соответственно, Россия также снизила эмиссию  $\text{CO}_2$  на 3.48% (Boden et al., 2016). При этом наша страна не является лидером по суммарному объему ежегодных выбросов  $\text{CO}_2$ . Так, согласно данным, представленным Российской Федеральной Службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, выбросы  $\text{CO}_2$  на территории России составляют около 0.63 Гт С в год (Обзор состояния ..., 2014), что значительно выше таковых, показанных Информационным Аналитическим центром по диоксиду углерода (0.47 Гт С в год) (Boden et al., 2016). При этом, как по международным, так и по российским оценкам, более 50% всех антропогенных поступлений  $\text{CO}_2$  составляют его поступления при сжигании природного газа.

Таким образом поступление антропогенного CO<sub>2</sub> в атмосферу за период с 2006 по 2015 гг. на глобальном масштабе составило 10.3 Гт С в год (10 и 90% от землепользования и сжигания ископаемого топлива, соответственно). В то время как увеличение атмосферной фракции CO<sub>2</sub> оценивается величиной равной 4.5 Гт С в год (Le quer et al., 2016). Следовательно, средний годовой рост содержания CO<sub>2</sub> должен составлять около 5.3 млн<sup>-1</sup> при таком уровне поступлений углерода в атмосферу (Prather et al., 2012). Однако, как показано в таблице 1.3, фактический рост концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> значительно ниже.

Таблица 1.3 – Тенденция роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> на станции “Mauna Loa”\*

Декады, года	Скорость роста CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup> в год
2005-2014	2.11
1995-2004	1.87
1985-1994	1.42
1975-1984	1.44
1965-1974	1.06

\*Данные предоставлены Лабораторией Исследования Земли. Отдел Глобального Мониторинга (Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA).

Получается, что в атмосфере планеты ежегодно остается около половины (44%) углерода, поступившего из антропогенных источников, а остальная его часть утилизируется природными компонентами: наземной растительностью в процессе фотоассимиляции углерода и Мировым океаном в результате его растворения. Современные модели показали, что поглощение CO<sub>2</sub> наземными экосистемами и Мировым океаном составляет 3.1±0.9 Гт С в год и 2.6±0.5 Гт С в год, соответственно. При этом мощность как океанического, так и наземного стока атмосферного CO<sub>2</sub> постоянно возрастает (Le Quere et al., 2016). Так, скорость утилизации атмосферного CO<sub>2</sub> сухопутными биоценозами выросла в

два раза за последние 50 лет (в 1960-1969 гг. она составляла 1.7 Гт С в год). Научное сообщество пока не может объяснить, какие механизмы ответственны за этот рост. Наиболее вероятным объяснением является положительная обратная связь растительного пула  $\text{CO}_2$  с наблюдаемым изменением климата планеты (Zhu et al., 2016; Ito et al., 2016). Увеличение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  практически в полтора раза с начала промышленной революции стало причиной глобального потепления климата Земли на  $0.85^\circ\text{C}$  (разброс оценок составил от  $0.65$  до  $1.06^\circ\text{C}$ ) (Hartmann et al., 2013). Рост температуры воздуха и увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ , последнее оказывает удобряющий эффект на растения, усиливают продуктивность лесов. Это подтверждают многолетние спутниковые наблюдения за растительным покровом. Так, показано, что площадь листового покрытия на континентах увеличилась на  $0.068\text{ м}^2$  листьев на  $\text{м}^2$  площади с 1982 по 2009 гг. (Zhu et al., 2016). Кроме того, по данным станции “Borow” ( $71.3^\circ$  с.ш.,  $156.6^\circ$  з.д.) доказано возрастание сезонной амплитуды атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  на 38.5% с 1974 по 2013 гг. Последнее связывают не только с ростом температуры воздуха и усилением продуктивности экосистем (увеличение амплитуды  $\text{CO}_2$  на  $1\text{ млн}^{-1}$  соответствует возрастанию чистой экосистемной продукции на 0.13-0.22 Гт С (Wenzel et al., 2016)), но и с ростом гетеротрофного дыхания в бореальных и арктических экосистемах.

Около половины растительного стока атмосферного  $\text{CO}_2$  происходит в нетронутых тропических лесах, а вторая часть во внетропических (севернее  $30^\circ$ ) регионах Северного полушария (бореальный (20%) и умеренный (30%) пояса). Однако, несмотря на высокую продуктивность тропических лесов, их вклад в сокращение атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  минимальный, поскольку на территории этого региона регистрируются самые высокие поступления  $\text{CO}_2$  в результате землепользования и сведения лесов. Среди наземных биомов наиболее устойчивый сток атмосферного  $\text{CO}_2$  отмечается в лесах бореального пояса (Pan et al., 2011).

### 1.3. Роль бореальных лесов в динамике концентрации CO<sub>2</sub>

Бореальный пояс занимает обширную часть Северного полушария (между 45° - 53° и 67° - 72° с.ш.), его общая площадь варьирует от 900 до 1500 млн. га (Shvidenko, 2011; Viers et al., 2013). Основная доля бореальных лесов произрастает в России (61%) и Канаде (30%), остальная часть приходится на США, Швецию, Норвегию и Финляндию (Shvidenko, 2011). Лесной фонд РФ насчитывает около 900 млн. га, среди них на долю хвойных лесов бореального пояса приходится около 70% (Швиденко и др., 2003).

Биосферное значение бореальных лесов во многом обусловлено их способностью депонировать атмосферный углерод, тем самым уменьшая концентрацию CO<sub>2</sub> в атмосфере. Такое положение обусловлено не только гигантскими масштабами распространения бореальных лесов, но и спецификой их углеродного баланса (Shvidenko, 2011). Несмотря на то, что продуктивность бореальных лесов и редколесий существенно ниже, чем тропических или широколиственных лесов умеренной зоны, значительное депонирование углерода в них обусловлено заторможенностью процессов разложения растительного опада и аккумуляцией органического вещества в почвенном блоке биогеоценозов (Ведрова, Ваганов, 2009; Замолотчиков и др., 2011). Поэтому количество органического углерода, накопленного в почве бореальных лесов (в верхнем метровом слое) в три раза выше, чем в фитомассе (Nillson et al., 2000; Tornocai et al., 2009; Schepaschenko et al., 2011; Mukhortova et al., 2015). Так, по оценкам А.З. Швиденко и Д.Г. Щепашенко (2014) почвенный углерод и углерод растительного органического вещества соотносятся как 3.2:1. Углерод растительного органического вещества составляет около 47.8 Гт С, в том числе на живую фитомассу приходится 78.4%, остальная часть сосредоточена в мортмассе: сухостое, валеже и мертвых корнях.

Спутниковый мониторинг и атмосферные модели, верифицированные измерениями концентрации CO<sub>2</sub>, экосистемного CO<sub>2</sub>-газообмена и данными



лесной инвентаризации, свидетельствуют о том, что весь биом в целом функционирует как сток атмосферного CO<sub>2</sub>. Так Stephens et al. (2007) и Luysaert et al. (2008) оценили его в размере 1.3±0.5 Гт С в год и 1.5±0.6 Гт С в год, соответственно. Тогда как Y. Pan et al. (2011) рассчитали, что поглощение углерода бореальными биогеоценозами значительно ниже, около 0.5±0.1 Гт С в год, при этом от 82.5 до 93.6% этого углерода аккумулируется лесами, произрастающими на территории России. Хотя различными авторами показано, что отдельно для российских лесов сток атмосферного CO<sub>2</sub> составляет от 0.5 до 1 Гт С в год (Пулы углерода ..., 2007; Shvidenko, 2011; Ciais et al., 2010; Dolman et al., 2012; Швиденко и Щепаченко, 2014). Основной причиной большого разброса показанных выше оценок стока атмосферного CO<sub>2</sub> является ограниченное число длительных наземных частых наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub> на территории России, которые необходимы для увеличения точности атмосферных моделей. Немаловажное значение имеет применение разнообразных математических подходов к расчету атмосферного стока CO<sub>2</sub>, а также усреднение его за разные временные масштабы.

Около 70% бореальных лесов России или 42% хвойных пород планеты произрастает в Сибири (западная и восточная ее части, исключая Дальний Восток) (Schulze et al., 2002; Bird et al., 2002; Лесные экосистемы ..., 2002). Сибирские леса или азиатская часть бореального пояса в некоторые годы являются самым мощным стоком атмосферного CO<sub>2</sub> среди лесов всего бореального пояса (Pan et al., 2011). По разным оценкам они аккумулируют от 0.3 до 1 Гт С в год (Schulze et al., 1999; Quegan et al., 2011, Saeki et al., 2013). Вместе с тем сибирские экосистемы являются наиболее уязвимыми в контексте наблюдаемого потепления климата, поскольку рост температуры воздуха усиливает гетеротрофное дыхание и эмиссию CO<sub>2</sub> из почвы.

В работе Piao et al. (2008) отмечается, что в Северном полушарии, выше 60°, где происходит увеличение продолжительности вегетационного сезона из-за интенсивного потепления в регионе (около 1° С за последние 20 лет), в осенний период респираторный поток CO<sub>2</sub> из почвы возрастает сильнее, чем

ассимиляция  $\text{CO}_2$ , а в весенний – наоборот, при этом повышение продуктивности экосистем в весенний период только на 90% компенсирует поступление  $\text{CO}_2$  из почвы осенью. Кроме того, 60% сибирских лесов произрастает на криогенных почвах (третья часть криолитозоны расположена в России), где сосредоточено огромное количество органического углерода. В арктическом регионе и бореальном поясе в целом законсервировано 1035 Гт С, что составляет более 30% от всего органического углерода аккумулировано в почвенном блоке планеты (верхний 3 м горизонт) (Schuur et al., 2015). Эксперименты с нагреванием почвы, а также проведенные в лабораторных условиях, показали, что углерод мерзлотных грунтов начнет интенсивно выделяться в атмосферу с ростом температуры воздуха. При этом эмиссия углеродсодержащих ПГ при таянии криолитозоны носит экспоненциальный характер, а именно наибольшее количество газов поступит в атмосферу в первое десятилетие с начала таяния. Согласно экспертным заключениям при наблюдаемой скорости роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  и темпах потепления климата в глобальный цикл включится от 5 до 15% углерода, законсервированного в вечномерзлотных почвах (Schuur et al., 2015).

Поэтому длительные наблюдения за концентрацией ПГ и состоянием окружающей среды в Сибирском регионе имеют особенно важное значение для отслеживания показанных выше изменений.

#### **1.4. Измерения концентрации $\text{CO}_2$ на высотных мачтах**

Одним из методов, который позволяет успешно определить роль наземных экосистем относительно содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и отследить изменения в их функционировании со временем, является инверсионное моделирование или так называемый “top-down” подход. Основу этого подхода составляет параметризация атмосферных транспортных моделей измерениями концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  (Saeki et al., 2013; Winderlich et al., 2010;

Quegan et al., 2011). С использованием именно этого метода была определена величина глобального стока атмосферного CO<sub>2</sub>, а также выделены наземная и океаническая составляющие (Saeki et al. 2013; Le Quere et al., 2016). Вместе с тем в инверсионном моделировании ключевое значение имеет высота с которой отбираются образцы воздуха для определения в нем количества CO<sub>2</sub> и других ПГ.

В начале 1990-х годов группа ученых из Национальной Администрации США по океану и атмосфере (Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA) впервые предложила использовать мачты высотой 200-300 м для измерения концентрации CO<sub>2</sub> на нескольких высотах внутри ПСА (Kozlova et al., 2008). Такой режим наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub> позволяет в дневное время апробировать хорошо перемешанный ПСА, а в ночной период – одновременно как приземный слой, где происходит накопление CO<sub>2</sub>, так и вышележащий слой, где сохраняется динамика концентрации CO<sub>2</sub> предыдущего дня. В результате такого способа отбора проб воздуха сглаживается большая амплитуда суточных колебаний концентрации CO<sub>2</sub>, обусловленная функционированием растительности, и минимизируется влияние мелкомасштабных неоднородностей подстилающей поверхности (Winderlich et al., 2010). Поэтому получаемые измерения отражают локальные процессы около поверхности Земли и региональные влияния на верхней высоте (Andreae et al., 2015). Другим важным преимуществом измерений на высотных мачтах является тот факт, что получаемые измерения содержания CO<sub>2</sub> характеризуют огромную территорию вокруг высотной мачты, порядка 1 млн. км<sup>2</sup> (Gloor et al., 2001).

Изначально для научных исследований использовались уже существующие телевизионные и радиовышки. Так, в 1992 году на 610 м коммуникационной мачте в Северной Каролине, а в 1994 году на 447 м телевизионной мачте в Висконсине (Bakwin, 1998) были впервые начаты исследования вертикального профиля концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> во внутриконтинентальном регионе США. Позднее, в 1994 – 1996 гг. на этих

станциях было установлено оборудование для измерения других газов, а также изотопного состава воздуха (Bakwin et al., 1998). На территории Европы первая аналогичная станция “Hegyhatsal” была запущена в Венгрии в 1994 году (Haszpra, 1995). К настоящему времени Европейская часть Северного полушария наиболее плотно покрыта станциями систематического наблюдений за CO<sub>2</sub> и другими ПГ (рисунок 1.3).

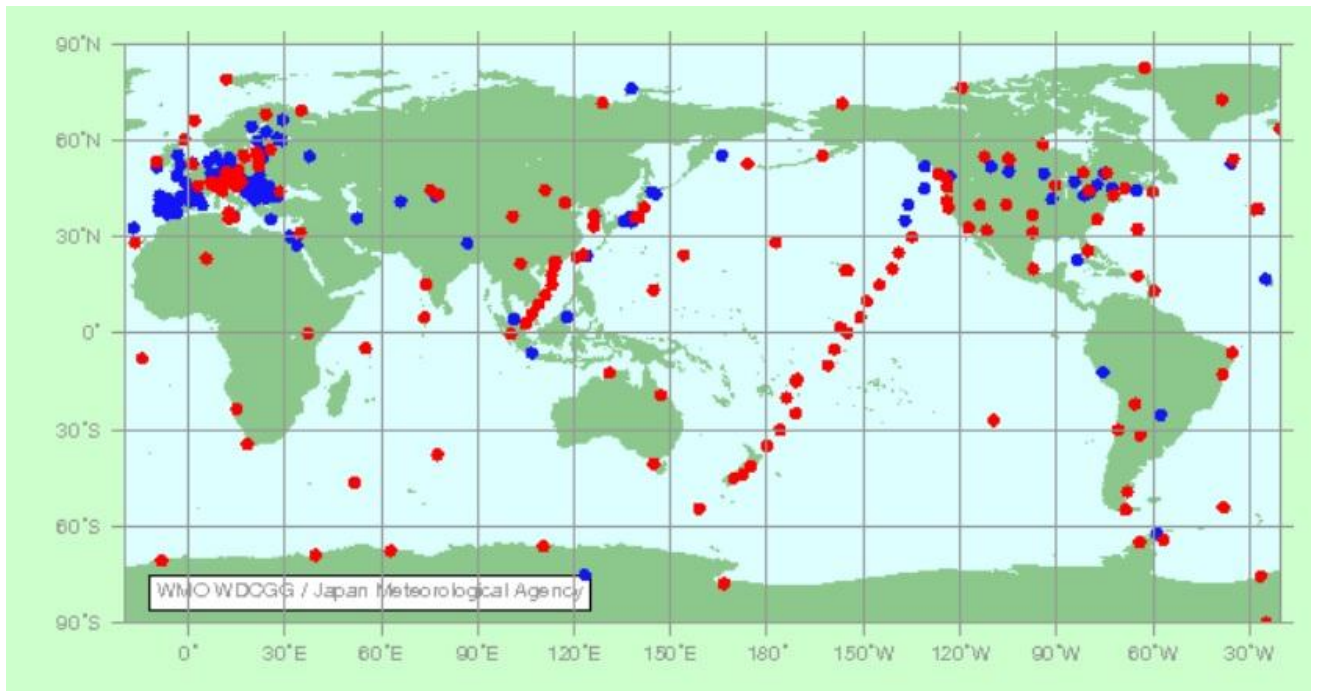


Рисунок 1.3 – Станции наблюдения за концентрацией парниковых газов и их изотопов. Карта предоставлена Мировым центром данных по ПГ (World Data Centre for Greenhouse Gases).

Большая часть из станций, приведенных на рисунке 1.3, оборудована высотными мачтами, которые измеряют концентрацию CO<sub>2</sub> либо в непрерывном режиме, с помощью газоанализаторов, либо с применением стеклянных емкостей, в которые отбираются пробы воздуха с последующим их анализом в лаборатории. Наиболее крупные сложившиеся сети наземного наблюдения за газовым составом пограничной атмосферы функционируют под эгидой Всемирной метеорологической организации (Бюллетень ВМО по Парниковым Газам №12, 2016) и Национальной администрации США по

океану и атмосфере (Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA), они включают 251 станцию в 51 стране мира.

### **1.5. Наблюдения за концентрацией CO<sub>2</sub> на территории РФ**

На территории России практически нет научно-исследовательских станций мониторинга атмосферы с применением мачт высотой более 200 м, за исключением города Обнинск, где проводятся наблюдения за концентрацией CO<sub>2</sub> на 300 м мачте с применением стеклянных емкостей (Арефьев и др., 2014). В настоящее время Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет) включает всего пять станций, четыре из которых являются пунктом периодического отбора проб атмосферного воздуха (Обзор состояния ..., 2016). Две станции Росгидромета, а именно «Териберка», расположенная на Кольском полуострове (побережье Баренцева моря), и «Тикси» в республике Якутия (побережье море Лаптевых), включены в программу Глобальной Службы Атмосферы (Бюллетень ВМО по Парниковым Газам №12, 2016). Три другие российские станции: «Новый порт» (побережье Обской губы, центр добычи природного газа), «Воейково» (пригород Санкт-Петербурга), «Обнинск» (пригород Москвы) подвержены антропогенному влиянию различной степени (Аршинов и др., 2012; Обзор состояния ..., 2016). Таким образом, существующая Российская государственная сеть мониторинга ПГ не проводит наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub> во внутриконтинентальных районах страны, где располагается основной сток атмосферного CO<sub>2</sub>.

Вместе с тем на протяжении последних двух десятилетий в нашей стране было реализовано несколько научных исследований, часть из них была направлена на краткосрочные наблюдения за вертикальным и пространственным распределением концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> с использованием авиационной и железнодорожной техники (Крутцен и др. 1996; Crutzen et al., 1998; Lloyd et al., 2002; Ramonet et al., 2002; Paris et al., 2008;

Аршинов и др., 2009; Paris et al., 2010; Sasakawa et al., 2013; Van der Laan et al., 2014), а другая часть нацелена на развитие сети долгосрочного мониторинга концентрации  $\text{CO}_2$  и других газов. Наземные станции систематического наблюдения за концентрацией атмосферного  $\text{CO}_2$  на территории России, координируемые разными структурами (Росгидрометом, Национальным институтом исследований окружающей среды (Япония) и Институтом Биогеохимии общества Макса Планка (Германия)) обобщены на рисунке 1.4.

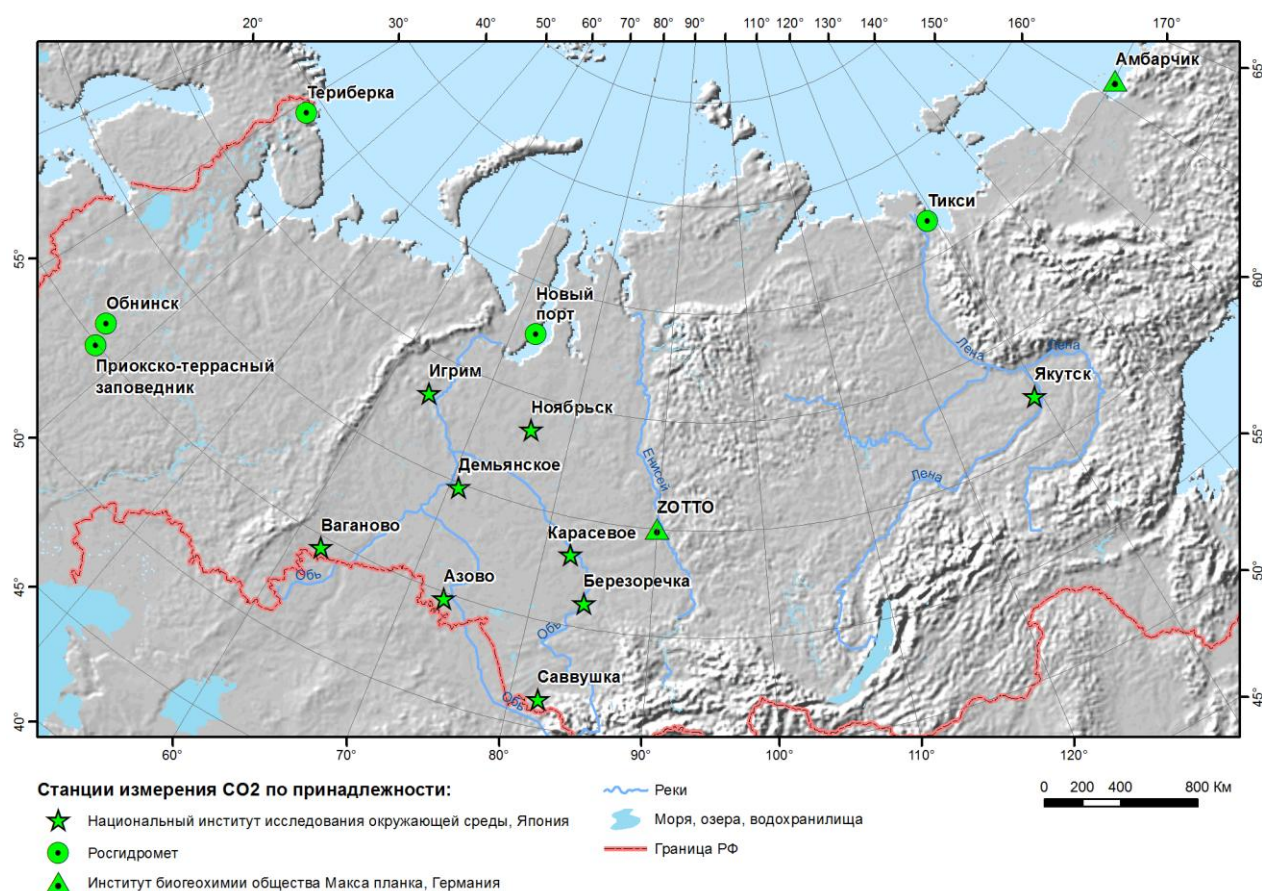


Рисунок 1.4 – Станции наблюдений за концентрацией атмосферного  $\text{CO}_2$  на территории России (карта подготовлена М.А. Корецом).

На сегодняшний день наиболее развитой региональной сетью станций наблюдения за концентрацией основных ПГ ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) является сеть «JR-STATION», которая покрывает практически всю Западную Сибирь и частично Якутию. Эта сеть организована при финансовой поддержке российско-японского проекта в рамках Международной геосферно-биосферной

программы, и она насчитывает 9 станций (Аршинов и др., 2009). Каждая станция включает стационарную мачту, высотой до 100 м, оснащенную стандартным набором метеорологического оборудования и газоанализатором фирмы LiCor для измерения концентрации CO<sub>2</sub>. Дополнительно, в рамках этого же сотрудничества, с 1994 года по настоящее время над Сибирью осуществляются исследования вертикального распределения ПГ с использованием самолета-лаборатории АН-30. Полеты проводятся один раз в месяц, при этом в ходе полета воздух с 8 высот, в диапазоне от 0.5 до 7 км, отбирается в стеклянные емкости. Места проведения зондирования находятся в трех городах: Новосибирск, Сургут и Якутск (Mochida et al., 2016). Самолетное зондирование стоит относительно дорого, поэтому осуществляется редко, обычно раз в месяц. Результаты этих наблюдений показали, что при включении в инверсионное моделирование измерений концентрации CO<sub>2</sub> региональной сети “JR-STATION” и с помощью самолета, снижает неопределенность расчетов атмосферного стока CO<sub>2</sub> в хвойных лесах Евразии на 29.1% (Kim et al., 2017). Следовательно, получение длительных непрерывных наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub> в Сибири является ключевой задачей для точного количественного определения поглотительной способности лесов всего бореального пояса.

### **1.6. Международная обсерватория “ZOTTO”**

С целью долговременного непрерывного мониторинга за состоянием приземной атмосферы над центральной частью Сибири в районе поселка Зотино Туруханского района Красноярского края была установлена обсерватория **Zotino Tall Tower Observatory** (“ZOTTO”), где мониторинг за состоянием атмосферы осуществляется с помощью 301-м мачты (ZOTTO Web, рисунок 1.5). Первые измерения были начаты уже в ноябре 2005 года, хотя официальное открытие станции состоялось летом 2007 года (Kozlova et al.,



2008).

Научная платформа “ZOTTO” построена в результате совместного проекта Международного Научно-Технического Центра, немецкого Общества Макса Планка и Российской Академии Наук. Главными исполнителями проекта явились Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Красноярск) и Институт биогеохимии общества Макса Планка (Йена, Германия).



Рисунок 1.5 – Вид на обсерваторию “ZOTTO”.

На международной обсерватории “ZOTTO” круглогодично осуществляется оперативный мониторинг широкого спектра приземных концентраций ПГ, таких как  $\text{CO}_2$ , метан ( $\text{CH}_4$ ), угарный газ, оксиды азота, озона, а также аэрозольных характеристик и метеорологических параметров под постоянным контролем технического персонала. Также одновременно с этими наблюдениями проводятся исследования изотопного состава основных ПГ –  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Все измерения, получаемые на обсерватории “ZOTTO”, отвечают стандартам Всемирного метеорологического общества и могут быть



использованы в рамках программ разного уровня по сокращению выбросов ПГ. К настоящему времени по результатам измерений на обсерватории “ZOTTO” получены первые важные результаты (Kozlova et al., 2008; Вивчар и др., 2009, Winderlich et al., 2010, Vasileva et al., 2011, Heintzenberg et al., 2011; Панов и др., 2011; Stjernberg et al., 2012; Heintzenberg et al., 2013; Chi et al., 2013; Winderlich et al., 2014; Konovalov et al., 2014; Тимохина и др., 2015; Тимохина и др., 2015; Михайлов и др., 2015; Панов и др., 2015).

Работа обсерватории “ZOTTO” рассчитана на 30-50 лет. Такие длительные наблюдения необходимы, главным образом, для повышения точности атмосферных моделей, но немаловажное значение имеет выявление долговременных тенденций в концентрации ПГ и их межгодовой variability во внутриконтинентальных районах России, таких как Сибирь.

В диссертационной работе представлен анализ временной (суточной и сезонной) динамики и скорости роста атмосферных концентраций  $\text{CO}_2$ , полученных на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”.

## ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ, СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДА АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO<sub>2</sub>

### 2.1. Характеристика района исследования

#### 2.1.1. Геоморфологическое описание

Измерения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> проводились на территории Средне-Енисейского опорно-экспедиционного пункта Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН или международной обсерватории “ZOTTO”. Обсерватория “ZOTTO” расположена на левом берегу р. Енисей, в 25 км западнее от пос. Зотино, Туруханского района Красноярского края (географические координаты: 60°48' с.ш., 89°21' в.д., высота над уровнем море: 114 м) (рисунок 2.1). В физико-географическом отношении этот район находится на восточной окраине Западно-Сибирской равнины, в краевой части Кеть-Сымской низменности (Куваев и др. 2001). Северная часть низменности, где расположена обсерватория “ZOTTO”, выделяется как Тугуланская котловина (Глебов, 1969; Глебов, 1988).

Тугуланская котловина представляет собой слабо расчленённую равнинную поверхность с незначительным уклоном в северо-восточном направлении (0.014-0.015 м), общей площадью около 2000 км<sup>2</sup> (Глебов, 1988; Куваев и др., 2001). С востока равнина примыкает к реке Енисей, с севера она граничит с нижним течением реки Дубчес, с северо-запада – платообразным повышением, южная граница определена не четко: по данным Ф.З. Глебова (1969) она проходит по левому берегу реки Сым, тогда как В.Б. Куваев и др. (2001) указывают на долину реки Нижняя (мелкий приток реки Енисей). В работах, освещающих геоморфологические характеристики восточной части

Западно-Сибирской равнины (Глебов, 1969; Жуков и др., 2001; Куваев, 2001), показано, что Тугуланская котловина является частью обширной озерно-аллювиальной равнины. Эта равнина в эпоху максимального самаровского ледникового покрова (плейстоцен, примерно 230-240 тыс. лет назад) была дном подпрудного ледникового водоема, входящего в систему енисейских подпрудно-ледниковых озер. После отступления ледника и исчезновения водоемов, водно-ледниковые отложения, подвергаемые ветровому воздействию, сформировали разнообразные гряды, валы, гривы и косы.



Рисунок 2.1 – Положение обсерватории “ZOTTO” на карте России.

По результатам исследований Ф.З. Глебова и др. (1969) главной геоморфологической особенностью Тугуланской котловины является наличие 5 развитых левобережных террас реки Енисей – низко-средняя (луговая) пойма, высокая пойма, первая, вторая и третья надпойменные террасы. Общая высота низко-средней и высокой пойм составляет около 15 м, суммарная ширина – до 4 км, при этом они наиболее выражены только на северной оконечности котловины. Четкой границы по морфологическим признакам между этими террасами не выявлено, хотя смена пойм опознается по изменению облика

почв, торфяной залежи и растительного покрова. Террасы сложены суглинками и супесями (Глебов, 1969; Глебов, 1988). Из верхних террас в северной части котловины, там, где расположена обсерватория “ЗОТТО”, господствующее положение занимает первая надпойменная терраса. Она имеет ширину 13 – 17 км, на востоке постепенно сливается с высокой поймой, а на западе со – второй надпойменной террасой, которая слабо выражена (Глебов, 1969; Куваев и др., 2001). Характер мезорельефа в этом районе представлен чередованием грядообразных холмов (высота до 15 м и шириной до 100 м) с корытообразными ложбинами между ними (глубиной 5 – 6 м и шириной до 120 м) (Глебов, 1969). В.Б. Куваев с соавторами (2001) отмечают, что главной особенностью региона является огромное количество ложбин стока ледниковых вод, днище которых представляют собой довольно плоскую заболоченную поверхность, также широко распространены озера с торфяными дном и берегами, которые представляют элементы топяно- и грядовоозерных болотных комплексов. Наиболее крупные озера с округлой формой могут достигать диаметра 1.5 км и глубиной 2 – 3 м (Глебов, 1969).

### 2.1.2. Климат

Обсерватория “ЗОТТО” расположена в центральной части материка Евразия на значительной удаленности от теплых морей Атлантического и Тихого океанов, с относительной близостью Северного Ледовитого океана (около 2100 км). Эти факторы определяют резко континентальный характер климата с умеренно суровой снежной зимой и теплым влажным летом (Григорьев и Будыко, 1956).

Характеристика климата выполнена нами с привлечением многолетних метеорологических наблюдений на двух станциях Росгидромета: в пос. Бор (географические координаты: 61°36' с.ш., 90°01' в.д., высота над уровнем моря: 63 м), расположенном на левом берегу реки Енисей (в 100 км севернее от

обсерватории “ZOTTO”), и пос. Сым (географические координаты: 60°21’ с.ш., 88°22’ в.д., высота над уровнем моря: 85 м), находящемся в среднем течении реки Сым (в 75 км на юго-западе от места исследования). Кроме того, дополнительно, применялись метеорологические наблюдения, полученные непосредственно на обсерватории “ZOTTO” с 2008 по 2013 гг. Необходимо отметить, что наиболее близко к обсерватории “ZOTTO” расположена метеорологическая станция села Ворогово (около 30 км в северо-восточном направлении от обсерватории “ZOTTO”). Однако этот населенный пункт находится на острове реки Енисей, вследствие чего испытывает ее специфическое влияние, поэтому в нашем анализе не рассматривался. И использованные данные метеостанций Бор (1936 – 2013 гг.) и Сым (1959 – 2013 гг.) были предоставлены “Национальным сервисом погоды” (NOAA. National Center for Environmental Information) и “Расписанием погоды” (Расписание погоды).

Термический режим района исследования – умеренный. Среднемноголетняя температура воздуха в январе по данным различных метеостанций варьирует от минус  $24.1 \pm 1.1^{\circ} \text{C}$  (пос. Сым) до минус  $24.7 \pm 1.0^{\circ} \text{C}$  (обсерватории “ZOTTO”); в июле – от  $+17.6 \pm 0.2^{\circ} \text{C}$  (пос. Сым) до  $+18.4 \pm 1.1^{\circ} \text{C}$  (обсерватория “ZOTTO”); среднегодовая температура воздуха – от минус  $3.4 \pm 0.3^{\circ} \text{C}$  (пос. Сым) до минус  $2.2 \pm 0.6^{\circ} \text{C}$  (обсерватория “ZOTTO”). Вегетационный сезон, а именно период, когда среднесуточная температура воздуха выше  $+10^{\circ} \text{C}$ , длится с мая по сентябрь (80 – 97 дней) (Куваев и др., 2001; Schulze et al., 2002). По данным В.Б. Куваева (2001) период с положительной температурой воздуха составляет 168 – 173 дней, обычно он начинается 24 – 27 апреля, а заканчивается 10 октября.

Среднемноголетнее годовое количество осадков в районе исследования изменяется от  $462 \pm 17$  мм (пос. Сым) до  $559 \pm 10$  мм (пос. Бор).

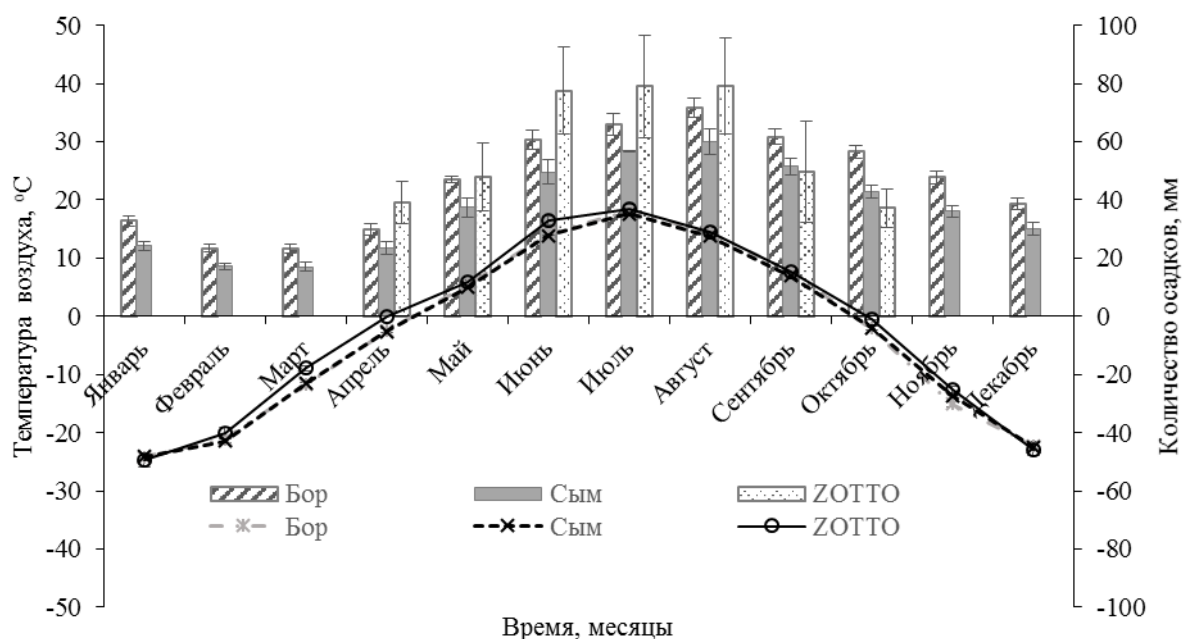


Рисунок. 2.2 – Климатограмма района исследования по данным метеостанций в пос. Бор, пос. Сым и обсерватории “ZOTTO”.

Климатограмма Госсена-Вальтера (рисунок 2.2) показывает, что за летний период выпадает около 47 – 50% годовой нормы осадков, равномерно распределенных в течение трех месяцев, что характеризует эту территорию как влажную (Средняя Сибирь, 1964). Устойчивый снежный покров образуется в середине октября, сохраняется до апреля, при этом высота его быстро нарастает, достигая максимума к концу февраля. Уровень снежного покрова в конце сезона достигает 65–75 см, а в многоснежные зимы может быть до 100 см. Число дней, когда поверхность покрыта снегом составляет около 60% года (208-219 дней) (Куваев и др.2001).

В работах, освещающих атмосферные процессы и климатообразование Сибири (Средняя Сибирь, 1964; Климатология, 1989; Хромов, 2006), указано, что для района, где расположена обсерватория “ZOTTO”, характерен юго-западный перенос воздушных масс, а формирование климата определяется зональной циркуляцией и влиянием Азиатского (Сибирского) антициклона в холодное время года. Азиатский антициклон – один из крупнейших барических центров атмосферы, его центр формируется над Тувой, Алтаем и Монголией (Средняя Сибирь, 1964). Он господствует с конца октября по начала апреля,

достигая максимального развития в январе. Большая часть Сибири находится вблизи центра этого антициклона, поэтому более 40% всех зимних антициклонов являются отрогами или периферийной частью Сибирского антициклона, они движутся с юго-востока на северо-запад России (Климат Красноярска, 1989). Под влиянием этих антициклонов продолжительное время (до 10 дней) стоит сухая малооблачная погода с сильными морозами. Такая же погода отмечается, когда над регионом перемещаются циклоны, сформированные над Баренцевым или Карским морями, либо над побережьем Северного Ледовитого Океана (на их долю приходится более 50% всех зимних циклонов). Зимние оттепели наблюдаются при циклонах, которые двигаются из Казахстана или республик Средней Азии, однако над территорией Сибири они проходят достаточно редко (Горбатенко и др., 2007). Наиболее часто зимняя теплая погода с обильными снегопадами характерна при антициклонах, которые перемещаются либо из Атлантики по траектории строго с запада на восток, из Европейской части России в Сибирь, либо с юго-запада на северо-восток, из районов Черного или Каспийского морей (Поднебесных, 2010).

В летний период очень жаркая и сухая погода устанавливается в регионе под влиянием южных циклонов, которые образуются в Средней Азии (города Ашхабад, Ташкент) и перемещаются с юго-востока на северо-запад. Высокая температура воздуха также наблюдается в антициклонах, которые двигаются из Европейской территории России. Смещение юго-западных циклонов с районов Черного и Каспийского морей вызывает летние обильные дожди. Наиболее часто холодная дождливая погода в летний период над Сибирью обусловлена прохождением либо антициклонов, сформированных над Новосибирскими островами (Арктика), либо северными циклонами, движущимися с побережья Северного Ледовитого океана (Горбатенко и др., 2007; Поднебесных, 2010).

Таким образом, район обсерватории “ZOTTO” отличается большой изменчивостью погоды, обусловленной активным перемещением барических образований (циклонов и антициклонов) над территорией Сибири.



### 2.1.3. Растительные условия

Район обсерватории “ZOTTO”, согласно лесорастительному районированию И.А. Короткова (1994), относится к Сымско – Дубческому лесорастительному округу среднетаежных лесов в пределах Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области Западно-Сибирского континентального сектора. Округ расположен на обширной территории междуречья рек Сым и Дубчес. Детализированный обзор растительных условий представлен в главе 3.

## 2.2. Системы измерения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> и метеорологических параметров

Инфраструктура обсерватории включает 301-метровую мачту, закрытое помещение (лабораторный бункер) с двумя контейнерами (рисунок 2.3а)), где размещено исследовательское оборудование, две метеорологические площадки (рисунок 2.3б)), три невысоких мачты, где проводятся исследования чистого экосистемного CO<sub>2</sub>-газообмена на основе метода микровихревых пульсаций и жилой дом для персонала.

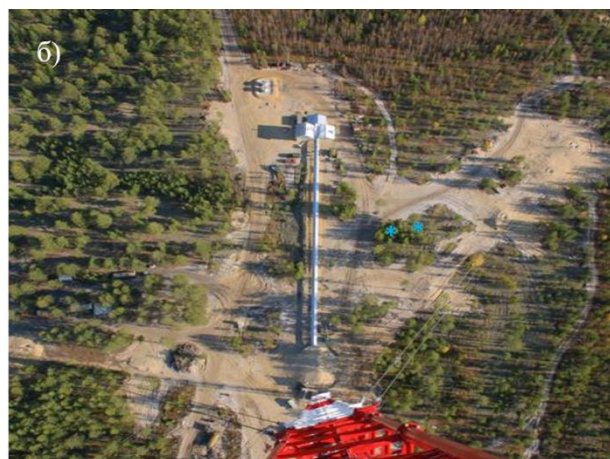


Рисунок 2.3 – Лабораторный бункер (а) и метеорологические площадки (отмечены голубым цветом) (б).



Мачта представляет собой стальную конструкцию высотой 301 м, с треугольным основанием, которая плотно зафиксирована на земле с помощью девяти металлических растяжек. Она условно разделена на 6 платформ: 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м, на каждой из которых установлены воздухозаборники и метеорологическое оборудование. Выбор высоты платформ обусловлен строительной спецификацией мачты.

### 2.2.1. Метеорологическое оборудование

Непрерывные метеорологические наблюдения за состоянием окружающей среды на обсерватории “ZOTTO” проводятся с 2008 года. Необходимое оборудование установлено на каждой из 6 платформ высотной мачты, а также на двух участках в 100 м (юго-восточное направление) от мачты (рисунок 2.3 б)). Участки различаются между собой степенью облесения: первый (условно обозначенный как “Лес”) расположен на месте, где густо произрастает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), а на втором (“Поляна”) – отсутствуют древесные растения. В структуре почвенного покрова участков фоновым является подзол иллювиально-железистый, в напочвенном покрове доминируют кустистые лишайники. Список метеорологического оборудования и его спецификация, представлены в таблице 2.1.

Все метеорологическое оборудование, за исключением ультразвуковых анемометров, функционирует с помощью четырех регистраторов данных (Campbell Scientific) под контролем PakBus операционной системы (версия 10). Под управлением этих регистраторов метеорологические датчики совершают измерения каждые 10 секунд, почвенный датчик влажности проводит измерения каждые 10 минут. Данные с четырех регистраторов передаются на стационарный ноутбук, установленный в бункере, где они автоматически усредняются до 10-минутных значений и в таком формате хранятся на жестком диске.

Таблица 2.1 – Метеорологическое оборудование и измеряемые параметры

Наименование измерительного оборудования	Метеорологические параметры, (ед. измерения)	Расположение		
		Мачта	“Поляна”	“Лес”
3D-ультразвуковой анемометр Solent-R3, Gill Instruments, Англия	Скорость (м/с) и направления (°) ветра	4, 52, 92, 156, 227, 301 м		
Датчик температуры и влажности КРК1/6-МЕ-Н38, MELA Sortertechnik, Германия	Температура (С°) и относительная влажность (%) воздуха	4, 52, 92, 156, 227, 301 м		
Мембранный датчик атмосферного давления R.M. Young Company, США	Атмосферное давление воздуха (гПа)	4, 92, 301 м		
Радиометр Kipp&Zonen, Голландия	Общая и рассеянная длинно- и коротковолновая радиация (Вт/м <sup>2</sup> )	301 м		
Датчик инсоляции Delta-T Devices, Великобритания	Общая и рассеянная фотосинтетическая радиация (мкмоль/м <sup>2</sup> /с)			2 м
Датчик ФАР- радиометр модель PAR lite Kipp&Zonen, Голландия		301 м		
Измеритель осадков ADOLF Thies, Германия	Количество осадков (мм)			2 м
Датчик измерения потоков тепла из почвы Rimco HP3/CN3 McVan Instruments, Австралия	Поток тепла из почвы (Вт/м <sup>2</sup> )		– 0.03 м	
Почвенный датчик влажности Theta Probe ML2x Delta-T Devices Ltd, Англия	Влажность почвы (Vol. %)		–0.08, –0.16, –0.32, –0.64, –1.28	
Почвенный термометр 902830 – Pt100 JUMO, Германия	Температура почвы (С°)		–0.02, –0.04, –0.08, –0.16, –0.32, –0.64, –1.28	

### 2.2.2. Газоаналитический комплекс EnviroSense 3000i

Газоаналитический комплекс для непрерывного измерения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе одновременно с шести высот 301-м мачты обсерватории “ZOTTO” был разработан и установлен Яном Виндерлихом в апреле 2009 года (Winderlich et al., 2010).

#### 2.2.2.1. Система подачи воздуха

Атмосферный воздух, для измерения в нем концентрации  $\text{CO}_2$ , отбирался с 6 высот мачты (301 м, 227 м, 158 м, 92 м, 52 м, 4 м над земной поверхностью) и затем, по трубопроводам, транспортировался в газоанализатор. Схема поступления воздуха с мачты в газоанализатор показана на рисунке 2.4. Основная часть измерительной системы газоаналитического комплекса находится в закрытом помещении (лабораторном контейнере бункера).

На каждой из измерительных высот мачты установлены грибовидные воздухоотборники, оснащенные полиэстеровыми фильтрами с размером пор 5 мкм (рисунок 2.5 а)). Относительно большая поверхность, как фильтра, так и кольцеобразного входного отверстия минимизирует возможное его засорение или обледенение в холодное время года. Воздухоотборники соединены с трубопроводами, диаметр которых составляет 12 мм, через них воздух поршневыми насосами втягивается в основную часть измерительной системы со скоростью 15 л/мин. Такая высокая скорость потока сокращает время пребывания воздуха в системе и уменьшает пристенные эффекты. Трубопроводы через кольцевое отверстие в стене бункера (рисунок 2.5 б)) поступают в лабораторный контейнер. При этом те части трубопроводов, которые расположены между внутренней стенкой бункера и контейнером,

электронно изолированы от их внешних частей (на мачте) нейлоновыми фитингами, которые защищают систему от грозовых разрядов.

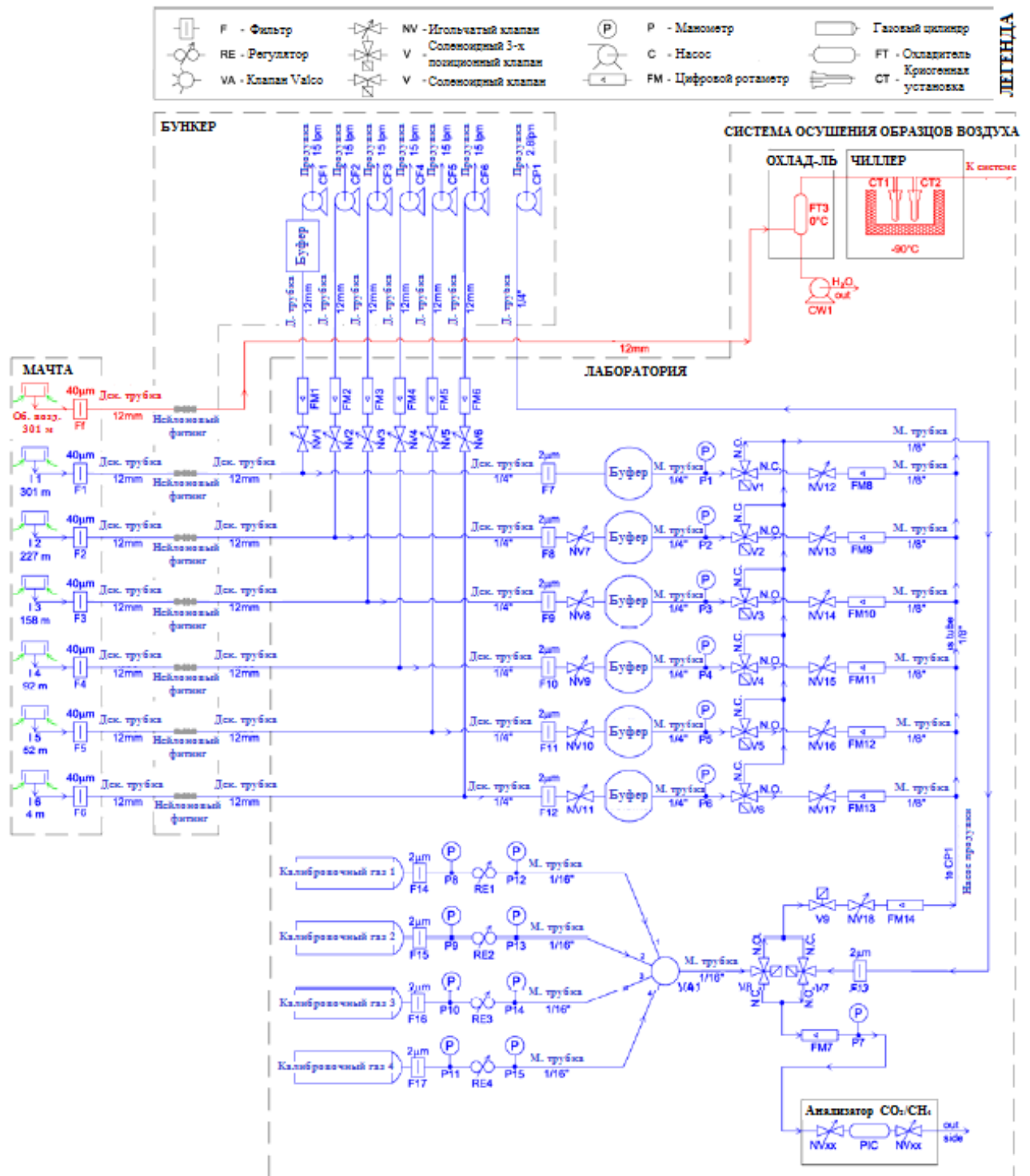


Рисунок 2.4 – Схема газоаналитического комплекса (цитировано по Winderlich et al., 2010).



Рисунок 2.5 – Грибовидные воздухозаборники (а) и кольцевидное отверстие бункера (б).

Скорость воздушного потока в каждом трубопроводе контролируется расходомерами и игольчатыми клапанами. В непосредственной близости от газоанализатора, в измерительном контейнере, воздушный поток из трубопроводов с помощью Т-образного разветвления разделяется на два. При этом только небольшая порция воздуха –  $150 \text{ см}^3/\text{мин}$  при стандартных условиях – извлекается внутренним насосом газоанализатора, а остальная часть удаляется из системы поршневыми насосами. Извлеченная часть воздуха ( $150 \text{ см}^3/\text{мин}$ ) поступает в стальные сферические емкости, их объем равен 8 л (рисунок 2.6). Использование специально сконструированных емкостей позволяет проводить измерения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на шести высотах мачты в непрерывном режиме с применением только одного газоанализатора. В результате лабораторных экспериментов установлено, что в емкостях сферической формы достигается идеальное перемешивания воздуха (Winderlich et al., 2010). Представленная система накапливает поступающие порции воздуха с каждой высоты примерно за 37 мин ( $8 \text{ л}/150 \text{ см}^3/\text{мин}$  при давлении 700 мбар), что позволяет сглаживать временное запаздывание между двумя последовательными измерениями и отображать концентрацию  $\text{CO}_2$  в образцах воздуха с разных высот одновременно, несмотря на то, что они анализируются последовательно.



Рисунок 2.6 – Система емкостей газоаналитического комплекса.

Система игольчатых клапанов контролирует давление воздушного потока в трубопроводах на выходе из стальных емкостей. На линии забора воздуха с высоты 301 м игольчатый клапан отсутствует, что позволяет избежать резкого падения давления. Для смягчения флуктуаций, возникающих в результате вибрации поршневого насоса, на этой линии установлен дополнительный буфер, расположенный немного выше насоса.

Поскольку измерение концентрации  $\text{CO}_2$  в газоанализаторе в реальном времени происходит только на одной высоте, то для исключения застоя воздуха в остальных пяти трубопроводах, не подверженных анализу, происходит непрерывная продувка. Ниже датчиков давления расположены трехканальные электромагнитные клапаны, которые контролируют направление воздушного потока между анализатором и продувочным насосом. Эти клапаны характеризуются плотным перекрытием при переключении, большим отверстием (исключает резкое падение давления) и низкой скоростью утечки газа ( $< 1 \text{ мкм/сек}$ ). Аналогичные клапаны установлены на калибровочной системе.

Поддержание одинаковых физических характеристик воздушного потока во всех трубопроводах достигается комбинацией игольчатых клапанов и

расходомеров. Отдельный расходомер контролирует скорость входящего в газоанализатор воздушного потока. Все расходомеры в системе не содержат подвижных частей.

#### **2.2.2.2. Принцип функционирования газоанализатора EnviroSense 3000i**

Измерения концентрации  $\text{CO}_2$  проводилось газоанализатором EnviroSense 3000i analyzer (Picarro Inc., USA, CFADS-17), который позволяет одновременно получать концентрации  $\text{CH}_4$  и водяного пара. Принцип работы данного газоанализатора основан на лазерной циркуляционной спектроскопии (рисунок 2.7). Уникальность этой технологии заключается в использовании специальной кюветы, которая включает несколько зеркал с высокой отражающей способностью (Crosson, 2008). Лучи света попадают на первое зеркало в кювете и частично отражаясь, достигают второго и так далее, формируя так называемое «нисходящее кольцо луча». Длина луча достигает нескольких десятков километров. Температура и давление внутри кюветы составляют  $40.000 \pm 0.004^\circ \text{C}$  и 187 мбар ( $140.0 \pm 0.04$  Торр), соответственно. Данный метод позволяет с большей точностью при маленьких длинах волн ( $\lambda = 1.651$  мкм для  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\lambda = 1.603$  мкм для  $\text{CH}_4$ ) анализировать образцы воздуха на содержание нескольких газовых компонентов одновременно. При этом очень важным является изотопный состав молекул в анализируемом образце ( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{12}\text{C}^1\text{H}_4$  и  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ).

Лабораторные эксперименты показали, что среднеквадратическое отклонение для первичных данных (0.2 Гц) менее  $0.06 \text{ млн}^{-1}$ , дрейф составляет менее  $0.25 \text{ млн}^{-1}$  в год. Точность прибора –  $0.09 \text{ млн}^{-1}$  (Winderlich et al., 2010). Автоматическая калибровка газоаналитического комплекса осуществлялась с периодичностью раз в 100 часов с использованием трех газов (таблица 2.2).

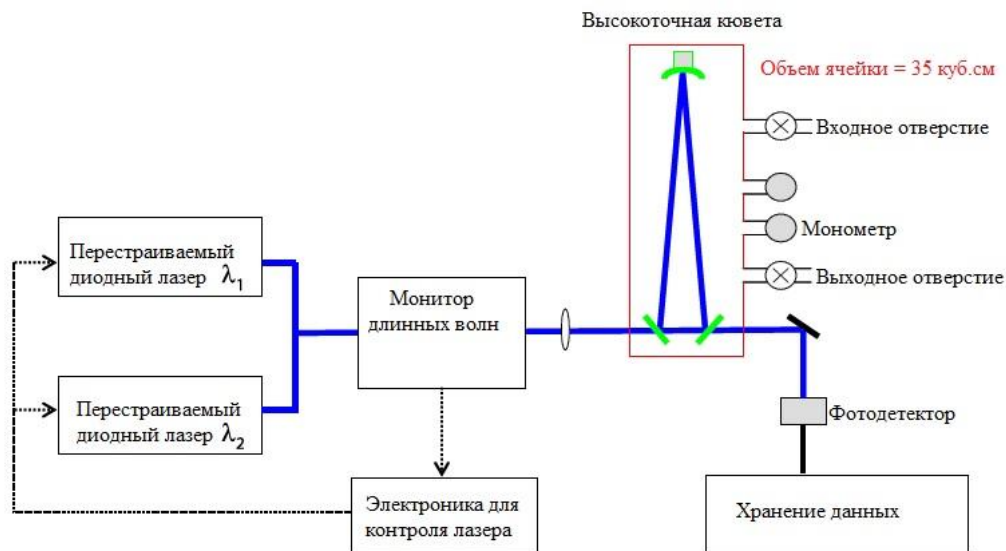


Рисунок 2.7 – Схема основных компонентов высокочувствительной оптической спектроскопии (цитировано по Crosson, 2008).

Таблица 2.2 – Концентрация CO<sub>2</sub> в калибровочных газах

Номер баллона	CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup>
1	354.71±0.08
2	394.60±0.06
3	453.12±0.08

Калибровочные газы хранятся в алюминиевых баллонах под давлением 200 бар, в горизонтальном положении. Концентрация атмосферного CO<sub>2</sub> в калибровочной смеси газов определялась в лаборатории института Биогеохимии общества Макса Планка и полностью соответствует требованиям Всемирной Метеорологической Организации (Winderlich et al., 2010).

#### 2.2.2.4. Коррекция первичных измерений концентрации CO<sub>2</sub>

Диоксид углерода хорошо растворим в воде, при этом интенсивность растворения имеет сильную зависимость от колебаний атмосферного давления. В климатических моделях, а также для удобного сравнения концентрации CO<sub>2</sub>



между разными станциями, используются те ее значения, в которых исключено влияние водяного пара ( $\text{CO}_{2\text{dry}}$ ). Поэтому нами проводилась коррекция первичных данных содержания диоксида углерода по отношению к концентрации атмосферного водяного пара по формуле, предоставляемой самой фирмой-производителем (Picarro Inc.):

$$\frac{\text{CO}_{2\text{wet}}}{\text{CO}_{2\text{dry}}} = 1 - 0.01244 \cdot \text{H}_2\text{O}_{\text{CRDS}},$$

где  $\text{CO}_{2\text{wet}}$  – измеренная концентрация  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_{2\text{dry}}$  – скорректированная концентрация  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_{\text{CRDS}}$  – измеренная концентрация водяного пара.

#### 2.2.2.5. Система регистрации измерений концентрации $\text{CO}_2$

Работа газоаналитического комплекса, а именно переключения между измеряемыми высотами, калибровочными и измерительными циклами, контролируются специально разработанным программным обеспечением LabView (National Instruments Germany GmbH), установленном на центральном компьютере системы. Вся информация с газоаналитического комплекса собирается на жесткий диск (PCI-6225).

Значения концентраций  $\text{CO}_2$  регистрировались с частотой 30 секунд в течение 3 минут на каждой измерительной высоте последовательно, при этом в базе данных сохраняются только значения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  за последние 2 минуты. Один полный цикл измерений, который начинается с верхней высоты (301 м), а заканчивается на последней высоте (4 м), составляет 18 минут. За период с 20 мая 2009 по 31 января 2016 получено 544861 измерения концентрации  $\text{CO}_2$  для каждой высоты. Из дальнейшего анализа исключались некорректные измерения, регистрируемые при перезагрузках и случайных сбоях системы. На обсерватории “ZOTTO” в течение всего года присутствует технический персонал, который контролирует своевременное устранение неполадок и сбоев в системе, обеспечивая получения непрерывного

ряда наблюдений за содержанием атмосферного  $\text{CO}_2$  в удаленной регионе России. Из-за краткосрочных нарушений в работе комплекса и проводимых на нем экспериментов различного характера за весь период измерений было исключено всего около 1 % от общего массива данных.

### 2.2.3. Система отбора проб воздуха в стеклянные емкости

Параллельно с измерениями концентрации  $\text{CO}_2$  дважды в неделю с высоты 301 м выполнялся отбор проб воздуха одновременно в три стеклянные емкости (объемом 1 л) для дальнейшего определения в них (методом масс-спектрометрии для изотопного анализа, который выполнялся в Институте Биогеохимии общества Макса Планка) содержания основных ПГ, в том числе  $\text{CO}_2$  и его изотопов ( $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{18}\text{O}-\text{CO}_2$ ) (рисунок 2.8).

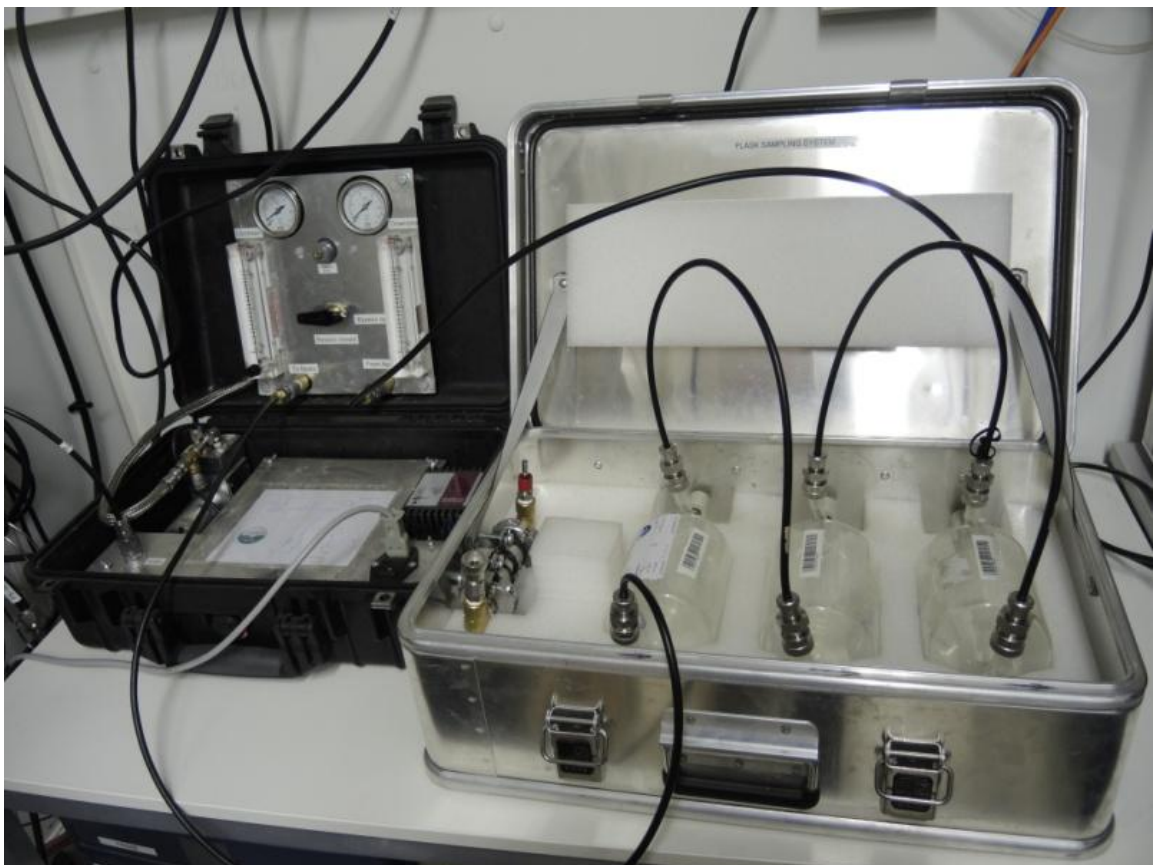


Рисунок 2.8 – Триплет стеклянных емкостей для отбора воздуха

Заполнение стеклянных емкостей осуществлялось в течение 15 минут со скоростью 2 л/мин, под давлением 900 мбар. При этом поступающий воздух осушался при прохождении через систему, состоящую из двух холодильников. В первом холодильнике воздух охлаждался до 6 °С, а во втором – до минус 92° С, где излишняя влага осаждалась на стеклянных шариках, предварительно установленных в ловушке Чилера. Перед каждым отбором систему трубопроводов продували компрессором со скоростью 2 л/мин в течение 40 минут. В диссертационной работе обсуждаются данные анализа проб воздуха в стеклянных емкостях, собранных за период с октября 2006 г. по декабрь 2010 г.

### **2.3. Методы анализа концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>**

Наблюдения за концентрацией CO<sub>2</sub> на обсерватории “ZOTTO”, как и любые другие длительные периодические измерения ПГ, являются временным рядом.

#### **2.3.1. Определение временного ряда**

Временной ряд — это множество числовых наблюдений, получаемых последовательно во времени (Лукашин, 2003). Основной характеристикой статистического анализа временных рядов является наличие порядка, в котором производятся измерения (Андерсон, 1976). Те временные ряды, в которых наблюдения проводятся через фиксированный интервал времени, представляющими собой дискретную последовательность, называются дискретными (Лукашин, 2003). Отдельные наблюдения временного ряда называются уровнями этого ряда (Кильдишев и Френкель, 1974).

Для описания временных рядов используют математические модели. Временной ряд  $(x_t)$ , генерируемый некоторой моделью может быть представлен в виде двух составляющих:

$$x_t = \xi_t + \varepsilon_t,$$

где величина  $\varepsilon_t$  это случайный процесс, значения которого не коррелированы, его свойства не изменяются во времени ( $t$ ), математическое ожидание (т.е. среднее значение) равно нулю, дисперсия – некоторая постоянная; величина  $\xi_t$ , это временная функция, описывающая регулярный процесс, называемая трендом (Лукашин, 2003). Тренд представляет собой закономерную, систематическую компоненту, изменяемую во времени, на которую могут накладываться множество факторов (сезонные эффекты или случайные колебания), действующих постоянно в течение длительного периода времени. Тренд временного ряда часто связан с действием физических законов или каких-либо других объективных закономерностей. Поэтому он может быть выражен как детерминированной, так и случайной функциями, либо их комбинацией. Компоненты временного ряда  $\xi_t$  и  $\varepsilon_t$  ненаблюдаемые, они являются теоретическими величинами, выделение которых составляет предмет анализа временного ряда.

Главной целью анализа временных рядов является выделение тенденции их изменений за рассматриваемый период, которая показывает общую наблюдаемую картину развития изучаемого явления (Лукашин, 2003; Кильдишев и Френкель, 1974; Боровиков, 2013). Для выделения тренда используют как линейную функцию, так и функции более сложной структуры. Кроме того, изначально сложно указать подходящую параметрическую кривую для аппроксимации ряда на всей его длине. Поэтому при выделении тенденций используют различные непараметрические методы анализа временных рядов, такие как экспоненциальное, медианное сглаживание или сглаживание скользящими средними (Розенберг и др., 1994). Необходимость сглаживания временных рядов обусловлена тем, что помимо влияния на уровни ряда главных факторов, которые, в конечном счете, и формируют конкретный вид

тренда, на них действует большое количество случайных факторов, вызывающих отклонения фактических уровней от тренда (Кильдишев и Френкель, 1974).

Во временных рядах нередко содержатся периодические колебания вокруг общей тенденции, являющиеся причиной того, что аппроксимация тренда функциями полиномиального типа не дает удовлетворительного результата. Среди периодичностей выделяют, главным образом, сезонную компоненту (Боровиков, 2013). Сезонная компонента – это относительно регулярные изменения временного ряда, возникающие с наступлением данного времени года и повторяющиеся с небольшими отклонениями из года в год (Кильдишев и Френкель, 1974). При исследовании временных рядов важно выделить сезонные колебания для того, чтобы затем их изолировать и изучить другие, более сложные, периодические компоненты. Выделяют два основных способа, с помощью которых периодические компоненты могут взаимодействовать с тенденцией: аддитивно и мультипликативно. В аддитивной форме модели этот ряд представляется в виде суммы:

$$x_t = \xi_t + s_t + \varepsilon_t,$$

а в мультипликативной форме в виде произведения:

$$x_t = \xi_t * s_t * \varepsilon_t,$$

где  $s_t$  – периодическая составляющая. Основные различия между этими двумя формами моделей проявляются в том, что в аддитивном случае ряд будет иметь постоянные сезонные колебания, величина которых не зависит от общего уровня значений ряда, а в мультипликативном случае величина сезонных колебаний меняется в зависимости от общего уровня значений ряда (Боровиков, 2013; Розенберг и др., 1994).

Главным способом обнаружения сезонности временного ряда является автокорреляционная функция, которая представляет собой множество коэффициентов корреляции между временным рядом  $x_t$  и этим же рядом, сдвинутым относительно первоначального положения на  $k$  моментов времени. Величина  $k$  называется сдвиг. Сдвиг, которому соответствует наибольший

коэффициент автокорреляции, обозначается временным запаздыванием или лагом. При наличии отчетливого тренда автокорреляционная функция приобретает характерный вид очень медленно спадающей кривой. В случае выраженной сезонности в графике автокорреляционной функции также присутствуют выбросы для запаздываний, кратных периоду сезонности (Кильдишев и Френкель, 1974; Боровиков, 2013).

Исследования периодичностей временного ряда, их амплитуд и фаз, проводят с помощью спектрального анализа, в основе которого лежит классический гармонический анализ. Идея гармонического анализа состоит в определении его основных синусоид, описывающих общие закономерности развития исследуемого временного ряда. Любой временной ряд можно представить в виде суммы конечного числа пар синусоидальных и косинусоидальных составляющих. Функция синуса и косинуса с определенным периодом и есть гармоника. Каждый член суммы представляет собой гармонику с определенным периодом. Под периодом понимается продолжительность по времени одного полного цикла (например, сезонность равная 12 месяцев) и это есть обратная величина к частоте. Первая гармоника имеет период, равный длине исследуемого периода, вторая – его половине, третья – его одной трети и так далее. Общее число гармоник не должно превышать  $\frac{p}{2}$ , если количество наблюдений равно  $p$ . Изменение периодической функции хорошо описывается несколькими первыми гармониками.

Если каждый уровень временного ряда представить, как части длины окружности (круговой частоты, выражаемой в радианах в единицу времени):

$$1 \frac{2\pi}{p}, 2 \frac{2\pi}{p}, \dots, t \frac{2\pi}{p}, \dots, p \frac{2\pi}{p},$$

то их зависимость записывается следующим образом:

$$y = a_0 + A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{p} t\right) + B_1 \cos\left(\frac{2\pi}{p} t\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{p} 2t\right) + B_2 \cos\left(\frac{2\pi}{p} 2t\right) + \dots,$$

или в короткой форме:

$$y = a_0 + \left[ \sum_{i=1}^{\frac{p}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi}{p} it\right) + B_i \cos\left(\frac{2\pi}{p} it\right) \right],$$

где  $a_0$  - это среднее значение показателя за весь период (тенденция);  $p$  - полный период;  $i$  - номер гармоники;  $\frac{2\pi}{p}t$  - переменная;  $A_i, B_i$  - коэффициенты (веса) гармоник, оцениваемые методом наименьших квадратов. Последнее слагаемое суммы называется тригонометрическим рядом Фурье (Кильдишев и Френкель, 1974). В итоге спектральный анализ определяет корреляцию функций синусов и косинусов различной частоты с наблюдаемыми данными. Если найденная корреляция (коэффициенты при синусах и косинусах) велика, то можно заключить, что существует строгая периодичность на соответствующей частоте в наблюдаемых данных. Стандартные методы предварительной обработки ряда включают косинус-сглаживание, вычитание среднего и удаление тренда. Результаты обычного спектрального анализа содержат коэффициенты частоты, периода, коэффициенты при синусах и косинусах, периодограмму и оценку спектральной плотности (Боровиков, 2013).

Анализ случайных процессов также проводится методами спектрального анализа. Это связано с тем, что иногда в случайной компоненте могут находиться скрытые закономерности. Однако, в данном случае используют не разложение в ряд Фурье, а преобразование Фурье. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) - это название целого ряда эффективных автоматических математических алгоритмов. БПФ производит приближенное вычисление преобразования Фурье для заданных уровней временного ряда, при этом используются спектральная плотность, ее амплитудно-частотной и фазово-частотная характеристики. При выделении вероятных закономерностей в случайных процессах используют метод фильтрации, а не сглаживания. Так, в области высоких частот применяют фильтр высоких частот, который выделяет в качестве полезного сигнала все составляющие с частотами, большими заданной, а в области низких частот - фильтр низких частот, которые

пропускает все составляющие с частотами, меньшими заданной, и удаляет из ряда все колебания с большими частотами.

Временной ряд концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  обычно содержит возрастающий тренд, обусловленный нарастающими эмиссиями  $\text{CO}_2$  от сжигания ископаемых видов топлива, сведения лесов и других изменений в землепользовании; сезонные (периодические) вариации, причиной которых являются биосферные процессы наземных экосистем и атмосферная циркуляция (климатическая смена времен года); нерегулярные (случайные) вариации связанные с климатическими флуктуациями, такими как, например Эль-Ниньо, крупномасштабными взаимодействиями в системе «атмосфера-океан» и вулканическими извержениями. Корректное выделение и последующая интерпретация каждой из этих компонент имеет важную фундаментальную роль в понимании и количественном оценивании как стоков/источников атмосферного  $\text{CO}_2$ , так и его временной изменчивости, (Pickers and Manning, 2015).

Анализ временных рядов наблюдений за концентрацией  $\text{CO}_2$  представляет сложный комплексный процесс поскольку данные или уровни ряда содержат многочисленные коэффициенты автокорреляции и различные периодические и случайные вариации как на длительных, так и коротких временных масштабах. Кроме того, пробелы в данных, которые могут произойти, например, по причине неисправности инструмента или перебоев в электроснабжении, приводят к нарушению равномерного распределения уровней ряда во временных рядах (Thoning et al., 1989; Nakazava et al., 1997; Pickers and Manning, 2015). Поэтому применение простых методов анализа, таких как экспоненциальное, медианное сглаживание или сглаживание скользящими средними, недостаточно для получения интересующих характеристик временного ряда.

В результате литературного обзора были выявлены основные методы анализа временных рядов, специально разработанных для длительных наблюдений (непрерывных или периодических (стеклянные емкости)) за



концентрацией атмосферного CO<sub>2</sub> и других ПГ (Keeling et al., 1989; Thoning et al., 1989; Cleveland et al., 1990; Nakazawa et al., 1997; Pickers and Manning, 2014). Эти методологические подходы широко используются мировым научным сообществом для анализа наблюдений за концентрацией атмосферного CO<sub>2</sub>, поэтому они хорошо апробированы и изучены. Основой данных подходов является удаление вариаций на очень коротком временном масштабе (от нескольких дней до недель) и выделение интересующих компонентов: сезонности и долгосрочной тенденции. Выделение компонентов осуществляется либо путем аппроксимации исследуемого ряда по всей его длине тригонометрическим рядом Фурье, который обычно состоит из суммы полинома второго или третьего порядка и трех или четырех гармоник (Keeling et al., 1989; Thoning et al., 1989), либо поэтапным сглаживанием уровней ряда различными методами (Cleveland et al., 1990). Принципиальное отличие этих подходов заключается в математических способах (кубический сплайн (Keeling et al., 1989), низкочастотная фильтрация (Thoning et al., 1989) или сглаживание (Cleveland et al., 1990)) анализа так называемых остатков, полученных в результате аппроксимации или сглаживания, что в последствии может привести к появлению различий в количественных характеристиках сезонности и междугодовых изменениях концентрации CO<sub>2</sub>. Однако, эти различия очень малы и часто не превышают средних статистических ошибок (Pickers and Manning, 2015).

### **2.3.2. Разложение временного ряда концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>**

Среди атмосферных исследователей наиболее востребованным является метод, предложенный K.W. Thoning и др., (1989). Этот метод хорошо апробирован (Bakwin et al., 1998; Higuchi et al., 2003; Haszpra et al., 2008; Graven et al., 2013; Zhang and Zhou, 2013; Sasakawa et al., 2013; Zeng et al., 2014; Liu et al., 2014; Schmidt et al., 2014; Fang et al., 2014; Pickers and Manning, 2015;

Hernandez-Paniagua et al., 2015; Kilkki et al., 2015; Huang et al., 2015; Zhang et al., 2015). Поэтому, анализ временных рядов концентрации  $\text{CO}_2$ , полученных на обсерватории “ZOTTO”, был выполнен с применением этого метода.

В качестве исходных уровней временного ряда использовались дневные значения концентрации  $\text{CO}_2$ , полученные за 6 лет и 8 месяцев (май 2009 – январь 2016 гг.) на обсерватории “ZOTTO” (рисунок 2.9) и усредненные с 13:00 до 17:00 часов местного времени (принцип усреднения этих значений представлен в главе 4). Исследуемый ряд наблюдений, как этого требует метод, является равномерно распределённым во времени, без длительных пропусков (имеющиеся короткие пробелы в данных были восстановлены линейной интерполяцией), количество измерений было кратно двум (Thoning et al., 1989).

Все необходимые расчеты были выполнены в Microsoft Office Excel 2007, программной среде R, в пакете RStudio 1.0.136, скрипты написаны Т.Кохом, Я. Виндерлихом и автором лично.

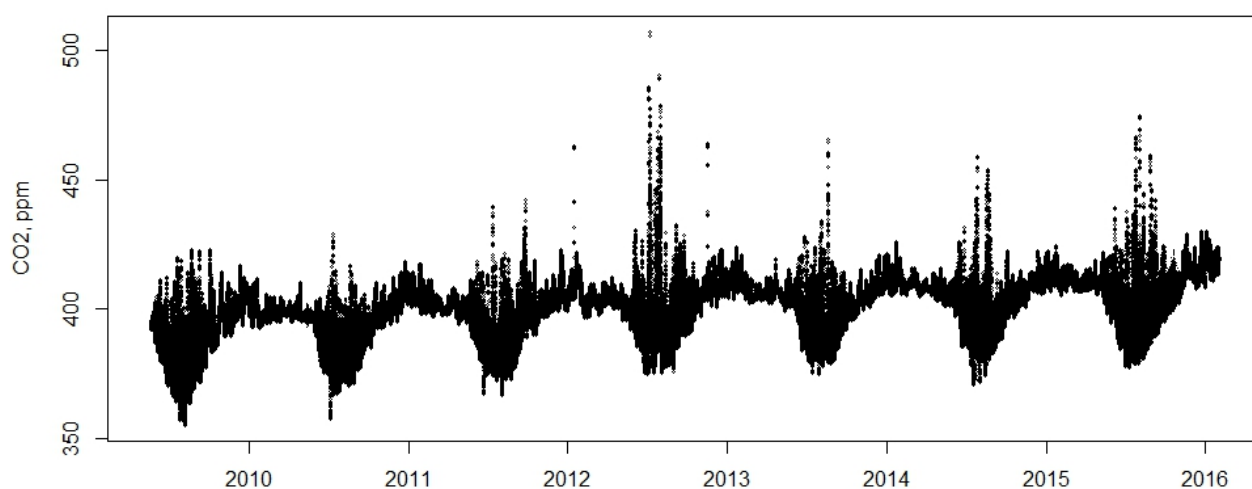


Рисунок 2.9 – Исходный временной ряд концентрации  $\text{CO}_2$ , полученный на высоте 4 м мычты обсерватории “ZOTTO”.

Первоначально исходный ряд наблюдений аппроксимировался функцией (2.1), которая описывала годовые колебания и временную тенденцию роста, присутствующих в исходном ряду наблюдений за концентрацией  $\text{CO}_2$ .

Временной тренд в функции (2.1) представлен полиномом первой степени, а сезонные осцилляции – суммой четырех гармоник годового цикла:

$$F(x) = a_0 + a_1 t + \sum_{n=1}^4 (b_n \sin(\frac{2\pi}{365} nx) + c_n \cdot \cos(\frac{2\pi}{365} nx)), \quad (2.1)$$

где  $x$  – время в днях с 20 мая 2009 по 31 января 2016,  $a_0$ ,  $a_1$ , – коэффициенты тренда,  $b_n$  и  $c_n$ , – веса гармоник.

Все коэффициенты и веса гармоник были рассчитаны методом наименьших квадратов. В результате выравнивания уровней ряда функцией (2.1) был получен расчетный временной ряд концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , представляющий собой сумму четырех гармоник и линейной функции.

На следующем этапе были вычислены остатки, а именно разность между наблюдаемыми значениями концентрации  $\text{CO}_2$  и значениями, рассчитанными по функции (2.1). Гистограмма, показанная на рисунке 2.10, свидетельствует о нормальности распределения остатков (их среднее значение равно нулю), что является признаком адекватности применяемой функции (2.1).

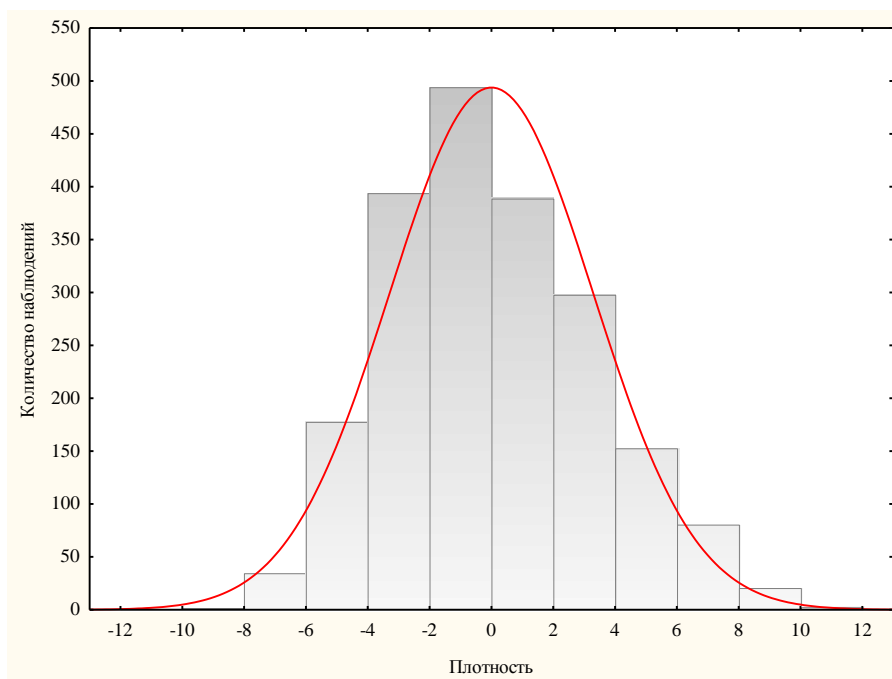


Рисунок 2.10 – Гистограмма распределения остатков

Вычисленное по ряду остатков значение  $3\sigma$  ( $\sigma$  – стандартное отклонение) использовалось нами как критерий оценки «выбросов» по всему

временном ряду (Nakazawa et al., 1997). «Выбросы» это измерение концентрации  $\text{CO}_2$ , отстоящее от расчетной кривой (по функции (2.1)) на  $\pm 3\sigma$ . Выявленные аномальные значения концентрации  $\text{CO}_2$  временно устранялись из временного ряда. Таким образом, был получен новый временной ряд, в котором аномально высокие и низкие значения концентрации  $\text{CO}_2$  были исключены. Процедура аппроксимации наблюдений по функции (2.1) и расчет остатков была повторно проведена 6 раз, пока не были найдены и исключены все «выбросы».

Далее, полученный после 6 процедур (финальный) ряд остатков подвергался низкочастотной фильтрации с помощью быстрого преобразования Фурье. Это процедура необходима для выявления краткосрочных (более 2-х месяцев) и долгосрочных (более 2-х лет) вариаций концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , которые не определяются формулой (2.1). Для выполнения этой процедуры исходный ряд данных преобразовывался в частотную форму через быстрое преобразование Фурье, а затем подвергался фильтрации и возвращался в исходный формат посредством обратного преобразования Фурье. Низкочастотная фильтрация остатков проводилась дважды, а именно с частотами 6.0 и 0.55 Гц, что эквивалентно сглаживанию в 100 и 667 дней, соответственно.

Исследуемые в диссертационной работе характеристики временного ряда концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  определялись как комбинации отдельных частей функции (2.1) со сглаженными в результате низкочастотной фильтрации остатками:

**Сглаженный временной ход** – временной ряд, в котором исключены только краткосрочные вариации (до 100 дней). Он представляет собой сумму значений концентрации  $\text{CO}_2$ , рассчитанных по формуле (2.1), и остатков, полученных при низкочастотной фильтрации с частотой 6.0 Гц.

**Долгосрочный тренд** – временной ряд, в котором исключена годовая сезонность. Он представляет собой сумму значений концентрации  $\text{CO}_2$ ,

рассчитанных только по первой части функции (2.1) (полином первой степени) и остатков, полученных при низкочастотной фильтрации с частотой 0.55 Гц.

**Сезонный ход** – временной ряд, в котором исключен долгосрочный тренд. Он представляет собой сумму значений концентрации  $\text{CO}_2$ , рассчитанных по второй части функции (2.1) (сумма четырех гармоник) и остатков, полученных при низкочастотной фильтрации с частотой 6.0 Гц.

**Скорость роста** – временной ряд, полученный в результате взятия производной от долгосрочного тренда.

Таким образом, измерения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , получаемые на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” являются дискретным временным рядом, в котором присутствуют его классические компоненты: временной тренд роста, сезонность и случайная компонента. Атмосферными исследователями разработаны специальные алгоритмы (методы) выделения этих характеристик, которые широко используются мировым научным сообществом в области экологии. Используя один из этих методов, предложенный K.W. Thoning и др. (1989), временной ряд наблюдений за концентрацией атмосферного  $\text{CO}_2$ , полученный на обсерватории “ZOTTO”, был разложен на интересующие характеристики, анализ которых представлен в 5 и 6 главах диссертационной работы.

### **ГЛАВА 3. ВЫЯВЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ (ФУТПРИНТА), ОКАЗЫВАЮЩЕЙ ВЛИЯНИЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ CO<sub>2</sub>, ИЗМЕРЯЕМУЮ НА ВЫСОТНОЙ МАЧТЕ ОБСЕРВАТОРИИ “ZOTTO”**

В последние десятилетия за счет быстрого повсеместного увеличения количества разнообразных постов наблюдений за содержанием атмосферных газов наши знания о процессах круговорота углерода значительно расширились. В первую очередь к таким постам относятся станции долговременного инструментального мониторинга концентрации CO<sub>2</sub> с использованием высотных мачт (>200 м) (смотри World Data Centre for Greenhouse Gases). Концентрация CO<sub>2</sub>, измеренная на высотных мачтах, это интегрированный сигнал для некоторой территории, содержащий информацию об обменных потоках углерода между различными наземными экосистемами и атмосферой. Очевидно, что одним из важнейших вопросов в атмосферных исследованиях содержания диоксида углерода является выявление пространственной репрезентативности получаемых измерений.

Согласно принятой в научном сообществе терминологии (Gloor et al., 2001; Chen et al., 2013; Winderlich, 2012), футпринт или зона влияния — это подстилающая поверхность вокруг высотной мачты, биогенные потоки углерода с которой в разной степени влияют на формирование концентрации CO<sub>2</sub>, регистрируемой на мачте за определенный интервал времени. Сведения о площади футпринта и его изменчивости необходимы как для надежного масштабирования полученных измерений атмосферных газов, так и для дальнейшей оценки бюджета углерода на региональном уровне с помощью инверсионного моделирования (“top-down” метод).

В главе представлены результаты определения площади футпринта для концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> за период с 2008 по 2012 гг. с помощью стохастической транспортной модели Stochastic Time-Inverted Lagrangian

Transport (**STILT**, [www.stilt-model.org](http://www.stilt-model.org)). Кроме того, для этого же периода, на основе данных спутникового картографирования растительного покрова России (Russian Land Cover, основанные на данных MODIS за 2014 г.), которая была предоставлена С.А. Барталевым (Барталев и др., 2011), выявлены основные классы подстилающей поверхности, влияющие в различной степени на формирование концентрации  $\text{CO}_2$ , измеряемой на мачте обсерватории “ZOTTO”. Результаты, представленные в данном разделе, получены при совместной работе с М.А. Корецом, Т. Кохам и К. Гербином.

### 3.1. Описание стохастической транспортной модели STILT

Футпринт был вычислен с помощью стохастической транспортной модели **Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT)**, размещенной на сервере Института биогеохимии им. Макса Планка (город Йена, Германия). В основе этой модели лежит расчет траекторий движения ансамбля индивидуальных частиц в некотором объеме воздуха от места их выделения с подстилающей поверхности до точки измерения концентрации  $\text{CO}_2$  на высотной мачте (рецептор) через обратное инвертирование временной шкалы путем решения системы уравнений Лагранжа (Lin et al., 2003). В наших расчетах ансамбль состоял из 100 частиц, где моделировалось движение каждой индивидуальной частицы, поэтому в конечном результате получался репрезентативный футпринт одного измерения концентрации  $\text{CO}_2$ . Передвижение каждой частицы представлялось как стохастический процесс, параметризованный компонентами ветра и турбулентными ковариациями. В качестве входных параметров модели STILT были подготовлены метеорологические поля (метеорологические данные предоставлены европейским центром прогноза погоды, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), для периода с января 2008 по декабрь 2013гг. (исключая май 2011 г. и июнь 2013 г.) с пространственным и временным разрешением

0.25°×0.25° и 3 часа, соответственно. В анализе использовано время пути частицы равное 240 часов. Для района обсерватории “ZOTTO” была определена территория (домен) с географическими координатами от 50° до 77° с.ш. и от 55° до 102° в.д., состоящая из множества индивидуальных ячеек (размером 1/12° по широте и 1/8° по долготе). Площадь выбранного домена составляет более  $6.9 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, что соответствует 4% от всей поверхности суши Земли. Внутри домена для каждой ячейки, за заданный интервал времени, модель рассчитывала вклад соответствующей подстилающей поверхности в регистрируемую на мачте концентрацию CO<sub>2</sub>. Зона влияния или футпринт, получаемая в STILT, это чувствительность мольной доли газов, транспортируемых в точку измерения ( $x_r$ ) за определенное время ( $t_r$ ), к эмиссии CO<sub>2</sub> с подстилающей поверхности  $F(x_i, y_j, t_m)$ . Иными словами, футпринт измеряет вклад источника/стока углерода в величину регистрируемой на мачте концентрации CO<sub>2</sub>. Поэтому, единицей измерения футпринта является млн<sup>-1</sup>/(мкмоль/м<sup>2</sup>сек). Математически футпринт выражается формулой:

$$f(x_r, t_r | x_i, y_j, t_m) = \frac{m_{air}}{h\bar{p}(x_i, y_j, t_m)} \frac{1}{N_{tot}} \sum_{p=1}^{N_{tot}} \Delta t_{p,i,j,k}$$

где,  $m_{air}$  это молекулярный вес воздуха,  $h$  – высота объема, в котором растворяется выделенный с поверхности ПГ,  $\rho$  – средняя плотность для всех частиц,  $N_{tot}$  - число частиц,  $\Delta t_{p,i,j,k}$  – общее количество времени, которое частица  $p$  находилась в определенном объеме  $i, j, k$  в течение времени  $t$  (Lin et al., 2003).

Зона влияния была смоделирована для каждого трех часов с 1 января 2008 по 31 декабря 2013 гг., за исключением двух периодов: с 21 апреля по 10 июня 2011 и 21 мая по 11 июля 2013 г., поскольку по техническим причинам невозможно было рассчитать метеорологические поля для мая 2011 г. и июня 2013 г. Трехчасовые футпринты последовательно суммировались друг с другом, чтобы получить месячный, сезонный (май – сентябрь) и годовой футпринты. В главе представлены результаты анализа сезонных (Май – Сентябрь) зон влияния для четырех лет: 2008, 2009, 2010 и 2012. Два года, а именно 2011 г. и



2013 г. были исключены, поскольку технически невозможно рассчитать футпринты для ключевых месяцев вегетационного сезона.

Для сезонных суммарных футпринтов исследуемых лет нами было исследовано пространственное распределения вкладов различных классов подстилающей поверхности. В работе использовались карты TerraNorte Russian Land Cover (RLC), в которых представлена классификация земного покрова территории России с пространственным разрешением 230 м, где при выделении классов растительности применялся алгоритм локально-адаптивной классификации LAGMA (Барталев и др., 2011). Эти карты основаны на данных спутникового наблюдения спектрорадиометром MODIS на борту спутника Terra. Карты RLC по данным 2014 года включают более 50 классов земной поверхности, из них только 27 обнаружены в зоне влияния, рассчитанной для измерений концентрации CO<sub>2</sub> на обсерватории “ZOTTO”. Присутствующие 27 классов были сгруппированы в 16 новых классов (таблица 3.1).

### 3.2. Сезонный футпринт

В результате проведенных нами расчетов установлено, что на протяжении вегетационного периода подстилающая поверхность всей выбранной нами территории (домен) в разной степени влияет на регистрируемую концентрацию CO<sub>2</sub> (рисунок 3.1). Поэтому, для выявления динамики изменения площади сезонного футпринта в течение исследуемых четырех лет были определены границы, которые соответствовали 75% от максимального вклада (75%-футпринт). Значения индивидуальной ячейки варьируют от 10<sup>-9</sup> до 10<sup>-2</sup> млн<sup>-1</sup>/(мкмоль/м<sup>2</sup>сек), тогда как 75%-ный контур ограничивает территорию вокруг обсерватории “ZOTTO”, внутри которой, вклады пикселей составили более 10<sup>-5</sup> млн<sup>-1</sup>/(мкмоль/м<sup>2</sup>сек). Таким образом, из дальнейшего анализа зоны влияния были исключены отдаленные регионы, а также те, что расположены за пределами РФ.

Таблица 3.1 – Классы земной поверхности RLC, присутствующие в футпринте “ZOTTO”, и их агрегирование

Номер класса	Название класса	Название агрегированного класса	Номер агрегированного класса
1	Темнохвойные вечнозеленые	Темнохвойные леса	1
2	Светлохвойные вечнозеленые	Сосновые леса	2
3	Лиственненные	Лиственненные леса	3
4	Лиственничные	Лиственничники	4
23	Лиственничные редины		
10	Смешанные леса с преобладанием хвойных пород	Смешанные леса	5
11	Смешанные леса		
12	Смешанные леса с преобладанием лиственных пород		
9	Лиственненные кустарники	Лиственненные кустарники	6
8	Луга	Луга	7
15	Прибрежная растительность	Прибрежная растительность	8
17	Травянистая тундра	Тундровая растительность	9
16	Кустарничковая тундра		
18	Кустарниковая тундра		
13	Открытые грунты и выходы горных пород	Открытые грунты и выходы горных пород	10
19	Открытые грунты и выходы горных пород		
20	Реки и водоемы	Реки и водоемы	11
6	Болота	Болота	12
7	Болота		
21	Болота		
24	Свежие гари	Свежие гари	13
19	Пахотные земли	Пахотные земли	14
31	Урбанизированные территории	Прочие классы	15
32	Вечные снега и льды		
5	Хвойные вечнозеленые кустарники		
14	Степи		
30	За пределами РФ/нет данных	Нет данных	16

Средний сезонный 75%-футпринт для 2008 – 2012 гг., исключая 2011 г., изменялся от 1.9 до  $2.3 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, при этом отчетливо выраженной тенденции в изменении его площади не обнаружено. Полученные результаты хорошо согласуются с оценками, показанными ранее в работе Gloor et al. (2001), для измерений ПГ на высотных мачтах (около  $10^6$  км<sup>2</sup>), а также с данными для мачт высотой < 100 м (от  $10^3$  до  $10^5$ ) (Chen et al., 2013).

На основе проведенного анализа выявлено, что территория в непосредственной близости к обсерватории “ZOTTO” (тёмно-коричневая область на рисунке 3.1) оказывает наибольшее влияние на измеряемую концентрацию CO<sub>2</sub>. Так, эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> из биогеоценозов, расположенных в радиусе 500 км, составляют более половины от всего сигнала, регистрируемого моделью. Вклад подстилающей поверхности снижается с увеличением расстояния от мачты. Тем не менее, следует отметить существенную несимметричность площади сезонного футпринта для измерений на мачте обсерватории “ZOTTO”, что обусловлено особенностями циркуляции атмосферы. Так, в регионе преобладает западный перенос воздушных масс и достаточно часто барические образования передвигаются с шельфа Северного Ледовитого океана вглубь материка. Поэтому, углерод, выделенный наземными экосистемами Западно-Сибирской равнины, наблюдается на мачте обсерватории “ZOTTO” значительно чаще по сравнению с таковым, образованным в районе Среднесибирского плоскогорья.

Анализ подстилающей поверхности, проведенный на основе классификации RLC, показал, что сезонный 75%-футпринт для измерений на обсерватории “ZOTTO” для четырех исследуемых лет включал примерно одинаковый набор классов растительности (рисунок 3.2). Наибольшую площадь занимали болота ( $20.0 \pm 2.1\%$ ), а затем по убыванию: лиственничники –  $14.4 \pm 4.1\%$ , смешанные леса –  $12.1 \pm 1\%$ , сосновые леса –  $10.3 \pm 0.3\%$ , лиственные леса –  $10.1 \pm 0.9\%$ , тундра –  $9.9 \pm 3.7\%$ , темнохвойные леса –  $7.6 \pm 0.5\%$ , луга –  $5.7 \pm 2.6\%$  и остальные классы –  $9.9 \pm 3.4\%$ .

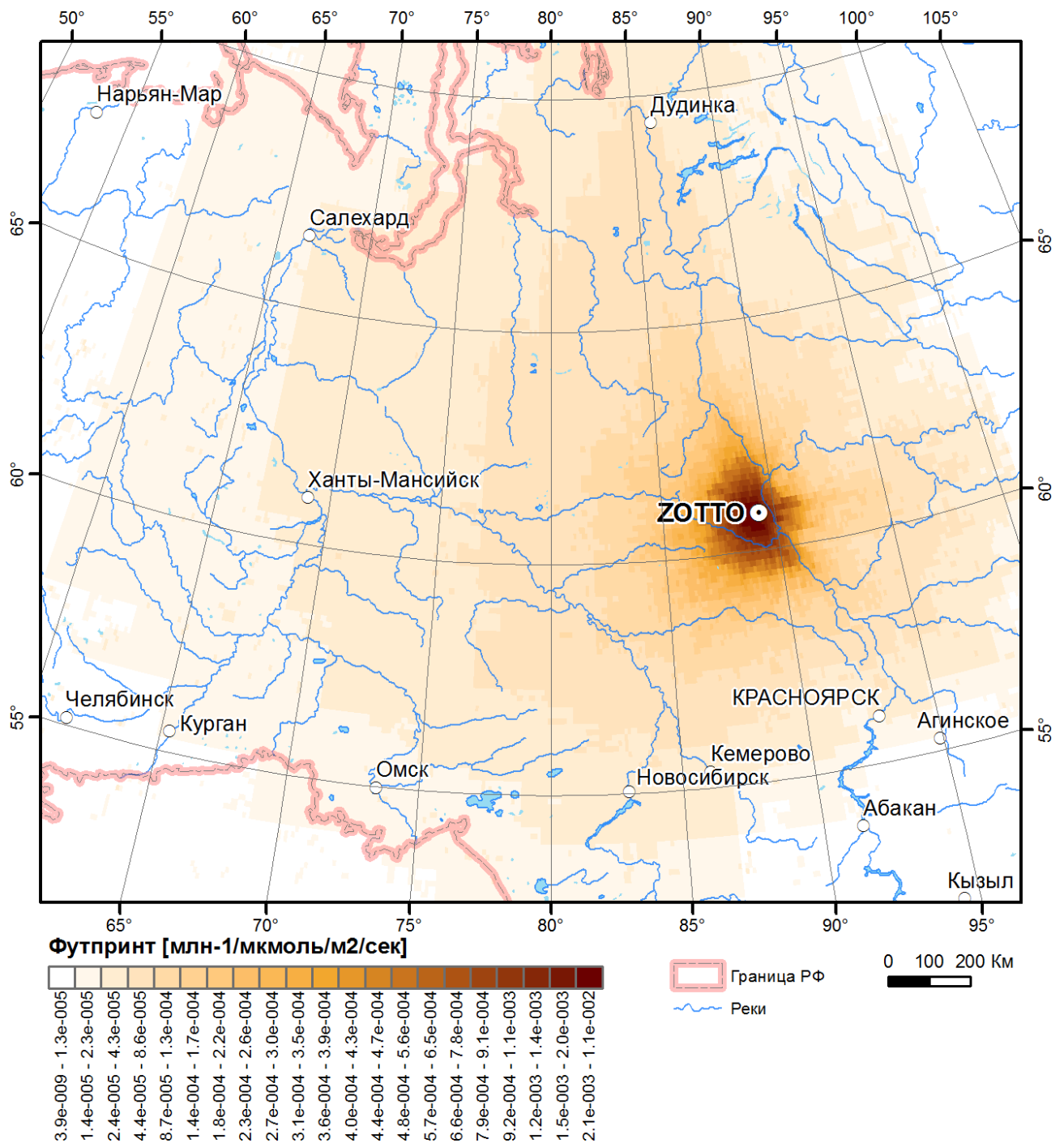


Рисунок 3.1 – Средний интегрированный сезонный футпринт для измерений  $\text{CO}_2$  на мачте обсерватории “ZOTTO”, рассчитанный (высота 301 м) на основе обратных траекторий (10 дней), для каждых трех часов с 1 мая по 30 сентября в течение четырех лет (2008, 2009, 2010 и 2012 года). Рисунок подготовлен М.А. Корцом.

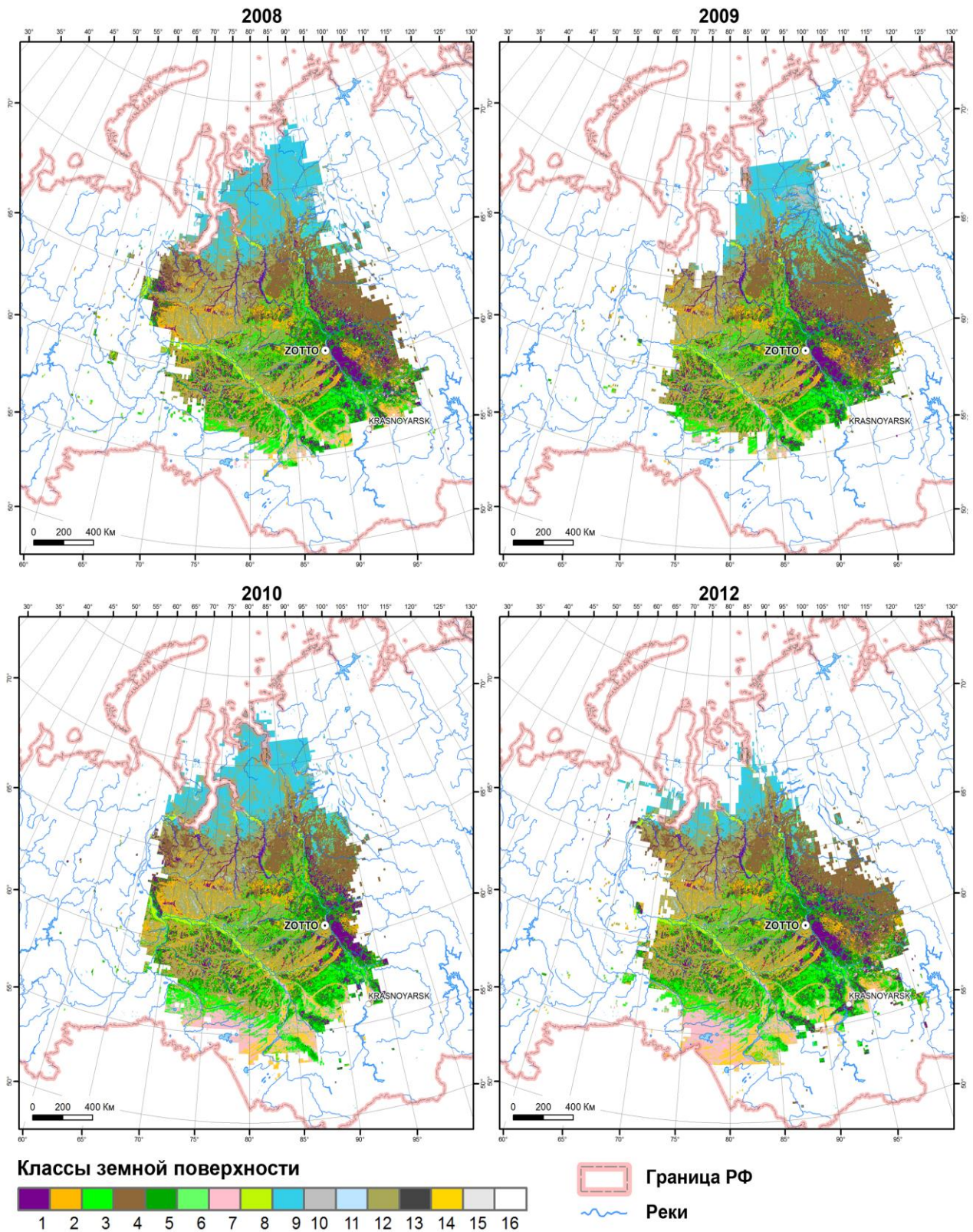


Рисунок 3.2 – Классы земной поверхности, согласно классификации RLC, которые составляют сезонные 75% - футпринты для измерений на мачте обсерватории “ZOTTO” для исследуемых лет. Легенда классов земной поверхности указана в соответствии с таблицей. Рисунок подготовлен М.А. Корецом.



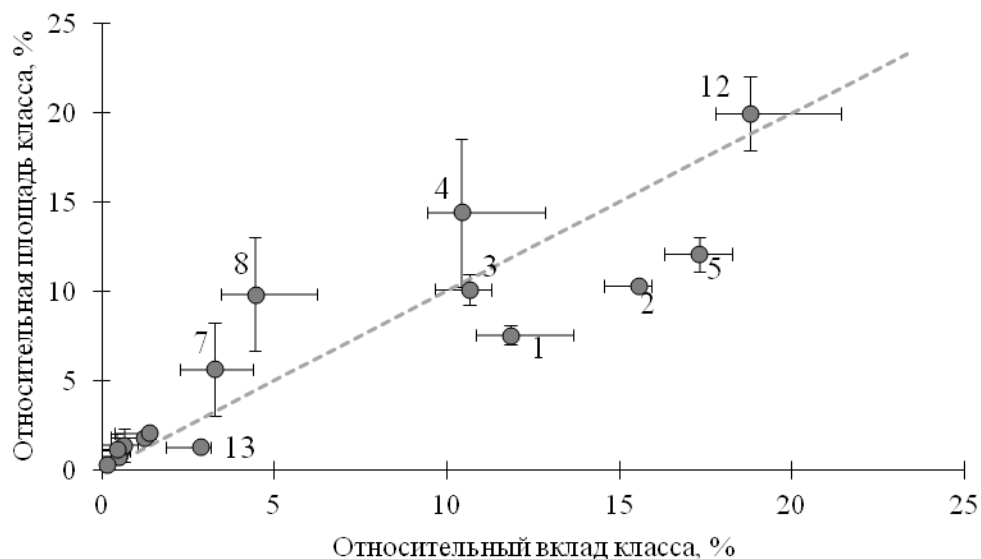


Рисунок 3.3 – Зависимость относительной площади класса подстилающей поверхности от его относительного вклада для 75%-футпринта обсерватории “ZOTTO” для исследуемых четырех лет (указаны средние значения и стандартные отклонения). Обозначения классов земной поверхности представлено в соответствии с таблицей.

Как видно на рисунке 3.3, величина суммарного вклада болот (12 класс) на регистрируемую концентрацию  $\text{CO}_2$  на мачте обсерватории “ZOTTO” максимальна среди других типов растительности, кроме того она также соответствует наибольшей площади класса ( $18.8 \pm 2.6\%$ ). Наличие огромных болотных массивов в западной части сезонного 75%-футпринта обсерватории “ZOTTO” обусловлено геоморфологическими особенностями рельефа, которые способствуют значительной заболоченности региона. Так, в Западной Сибири располагается один из крупнейших болотных комплексов мира – Васюганские болота, площадь которого составляет около  $0.7 \times 10^6 \text{ км}^2$  (Peregon et al., 2009). При этом, согласно нашим расчетам, болота разных типов покрывают от 0.36 до  $0.51 \times 10^6 \text{ км}^2$  зоны влияния и большая часть из них относятся к Васюганским болотам.

Однако, кроме биогенных потоков углерода, Западная Сибирь, особенно ее северная часть, характеризуется значительными антропогенными эмиссиями  $\text{CO}_2$ , образуемых при сжигании попутного газа и утечке природного газа из

трубопроводов при его транспортировке, поскольку она является одним из крупнейших нефтегазоносных регионов мира (Umezawa et al., 2012). Полученные нами оценки сезонного футпринта дают основание предполагать, что обсерватория “ZOTTO” также частично находится под влиянием этих выбросов.

Лесные экосистемы, а именно сосновые, темнохвойные и смешанные (1, 2 и 5 классы, соответственно) леса (рисунке 3.3) совместно оказывают наибольшее воздействие на концентрацию CO<sub>2</sub>, регистрируемую на мачте обсерватории “ZOTTO” (до 45%), при этом площадь, занимаемая этими экосистемами, составляет всего треть суммарного сезонного 75%-футпринта. Значительный вклад этих типов растительности, вероятно, обусловлен тем, что они произрастают в непосредственной близости к обсерватории “ZOTTO” в отличие от лиственничников, лугов и прибрежной растительности (4, 7 и 8 классы). Так, по результатам комплексных инвентаризационных исследований, проведенных в радиусе 100 км вокруг высотной мачты обсерватории “ZOTTO” (31394 км<sup>2</sup>, 14.4% от суммарного футпринта), установлено, что преобладающими типами леса являются ельники и пихтаци зеленомошные (46%). На левобережье реки Енисей темнохвойные леса занимают переувлажненные участки со слабым дренажем и долины крупных водотоков, которые систематически подтапливаются весенними паводками. На правобережье, где расположена большая часть всей площади, занимаемой темнохвойными лесами, они частично замещаются мелколиственными породами вследствие прохождения пожаров. Как правило, темнохвойные коренные сообщества после пожара восстанавливаются через длительно-производную смену главных пород, поэтому в окрестностях обсерватории “ZOTTO” представлены, главным образом, древостоями на заключительной стадии послепожарного восстановления, возрастом более 130 и 160 лет (Климченко и др., 2011). Доля березняков и осинников, образованных разновозрастными древостоями от 40-60 (лиственные с подростом хвойных) до более 90 лет (смешанные темнохвойно-лиственные древостои с преобладанием

лиственных пород), и болотных экосистем в 100 км радиусе составляет, соответственно, 12.3 и 10.5%. Дополнительную мозаичность в биогеоценотический покров вносят сосняки зеленомошные (8.3%) и сосняки лишайниковые (7.6%) на 38 и 45%, соответственно, состоящие из перестойных древостоев (более 200 лет), и кедрачи зеленомошные (1.8%). Сосняки зеленомошного типа занимают пониженные формы рельефа и более влажные местообитания, тогда как лишайниковые сосняки предпочитают возвышенности (холмы, гряды) и хорошо дренируемые участки. Это чистые, одноярусные сосняки, представленные сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*), под пологом которых практически отсутствуют подчиненные древесные ярусы (Климченко и др., 2011).

Лиственничники (4 класс) покрывают восточную часть суммарного сезонного 75%-футпринта обсерватории “ZOTTO” и занимают его краевое положение. Поэтому, за счет отдаленности и особенностей зональной циркуляции атмосферы (преобладание западного переноса воздушных масс) их вклад в концентрацию CO<sub>2</sub> существенно ниже по сравнению с другими типами наземных экосистем.

Регион, где расположена обсерватория “ZOTTO”, подвержен периодическому влиянию лесных пожаров. Последние случаи крупномасштабных лесных пожаров в этом районе отмечались в 2006 и 2012 годах, когда в результате продолжительной засухи и аномальной жары сформировались условия для их возникновения. Согласно нашим оценкам, площадь свежих гарей (13 класс) равна 28206 км<sup>2</sup> или 1.3% от суммарного сезонного 75%-футпринта. О.А. Антамошкиной и М.А. Корецом (2015) показано, что с 2000 по 2014 гг. вокруг обсерватории “ZOTTO” в радиусе 100 км огнем пройдено более четверти территории, что составило 8300 км<sup>2</sup> или 0.4% от суммарного 75%-футпринта, при этом 83% общей площади подвергшейся пирогенному влиянию за последние 15 лет приходится на 2012 г. Наибольшие площади повреждений наблюдаются в темнохвойных (3500 км<sup>2</sup>, сокращение распространения на 23%) и сосновых (2100 км<sup>2</sup>, сокращение на



42%) лесах. Эти результаты свидетельствуют о том, что площадь свежих гарей в суммарном сезонном 75%-футпринте может быть гораздо больше, чем определяется классификацией RLC карты.

### 3.3. Заключение к главе 3

Измерения концентраций  $\text{CO}_2$ , проводимые на высоте 301 м мачты обсерватории “ZOTTO”, характеризуют огромную территорию, площадь которой составляет до  $6.9 \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Сезонный 75%-футпринт для наблюдений на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” изменяется от 1.9 до  $2.3 \times 10^{-6}$  км<sup>2</sup>. Исследования такого характера особенно важны для территории РФ, поскольку государственная система инструментального мониторинга атмосферных концентраций ПГ во внутриконтинентальной части страны не развита в достаточной мере.

Уникальное местоположение обсерватории “ZOTTO” на восточной окраине Западно-Сибирской равнины, вблизи ее границы со Среднесибирским плоскогорьем, обуславливает большое разнообразие растительного покрова. Наибольший вероятный вклад в формирование концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  вносят болота, смешанные леса и сосняки, распространённые в западной части футпринта, а также темнохвойные леса, произрастающие в непосредственной близости к обсерватории с восточной стороны.

Представленные нами результаты в дальнейшем послужат основой для выявления количественного вклада каждого класса земной поверхности в измеряемые концентрации  $\text{CO}_2$  на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”. Предполагаемые исследования будут выполнены путем объединения футпринта с оценками чистого экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена, рассчитанных вегетационной моделью фотосинтеза и дыхания (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model, VPRM). Модель VPRM хорошо интегрирована с моделью STILT. По умолчанию VPRM использует в качестве входных параметров

классификацию земной поверхности SYNMAP. Однако, тестирование использования данного геоинформационного продукта для инверсионного моделирования концентраций  $\text{CO}_2$  для футпринта обсерватории “ZOTTO” выявило значительное расхождение с измеренными концентрациями  $\text{CO}_2$ . Тем не менее, при доработке алгоритма модели под региональные особенности могут быть получены достаточно точные оценки  $\text{CO}_2$ -газообмена с высоким пространственным и временным разрешением ( $> 1 \text{ км}^2$ , 3 ч.), что продемонстрировано для высоких широт Северной Америки моделью PolarVPRM (Luus and Lin, 2015). В связи с этим, базовая модель VPRM будет оптимизирована нами под набор классов земного покрова, полученный на основе RLC и актуальных измерений потоков  $\text{CO}_2$ , получаемых в окрестностях обсерватории “ZOTTO”.

## ГЛАВА 4. СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO<sub>2</sub>

Суточные колебания концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> отражают интегрированные сигналы дневных циклов биологических (дневная фаза фотосинтеза и дыхание) и атмосферных (динамика высоты пограничного слоя атмосферы (ПСА)) процессов, происходящих вблизи или на подстилающей поверхности, которые с увеличением высоты ослабляются и сглаживаются. Поэтому систематические непрерывные измерения концентрации CO<sub>2</sub>, проводимые по высотному профилю ПСА в течение суток, позволяют исследовать не только ее вертикальное распределение, но также рассчитать суммарные эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> из экосистем, образующих футпринт обсерватории “ZOTTO”, в атмосферу (Winderlich et al., 2014). Результаты этих расчетов будут рассмотрены в данном разделе.

### 4.1. Вертикальное распределение концентрации CO<sub>2</sub>

Анализ динамики концентрации CO<sub>2</sub> в ПСА, полученный на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” свидетельствует о существенных сезонных различиях ее суточного хода как на отдельных высотах, так и по всему высотному профилю в целом. На рисунке 4.1 представлена типичная средняя суточная динамика концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в столбе воздуха до 301 м для пятилетнего периода исследований (май 2009 г. – апрель 2014 г.), где каждая кривая – суточная динамика на фиксированной высоте в данном месяце. Наиболее выраженные изменения концентрации CO<sub>2</sub> в течение суток наблюдаются в теплое время (среднесуточная температура воздуха больше 0° С, май – сентябрь), тогда как в холодный период (среднесуточная температура воздуха меньше 0° С, ноябрь – февраль) они отсутствуют. Аналогичная

тенденция суточной динамики содержания диоксида углерода в приземной атмосфере на протяжении года наблюдается в других районах Сибири и Северного полушария (Bakwin et al., 1998; Naszpra, 1999; Higuchi et al., 2003; Виноградова и др., 2007; Kozlova et al., 2008; Аршинов и др., 2009; Аршинов и др., 2012; Popa et al., 2010; Watai et al., 2010; Winderlich et al., 2010; Vermeulen et al., 2011; Chen et al., 2013; Sasakawa et al., 2013; Zhang et al., 2013).

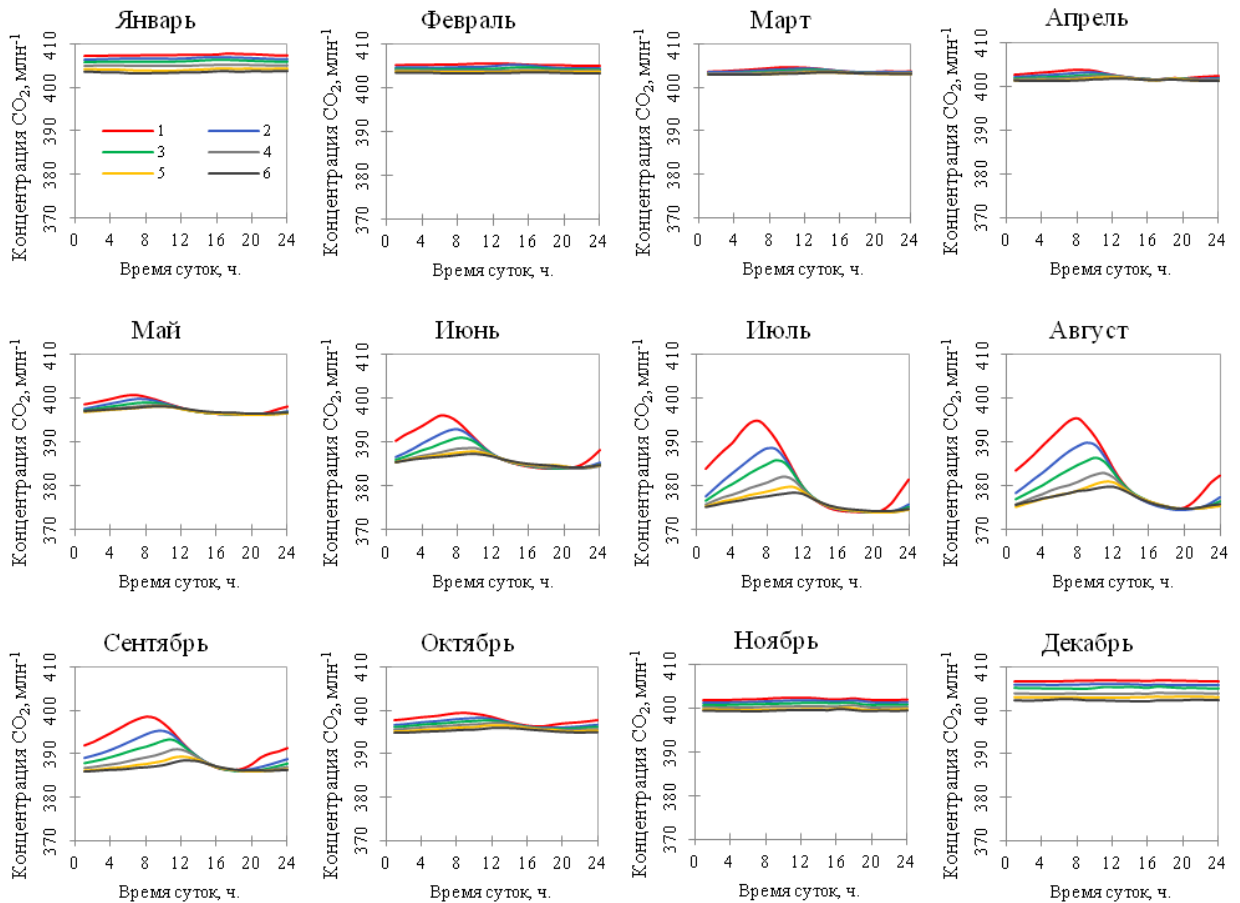


Рисунок 4.1 – Динамика суточной концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере на разных высотах в отдельные месяцы года для пятилетнего периода измерений (май 2009 г.– май 2014 г.). 1 – 6 – высота измерительного уровня в градации 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м, соответственно.

Значимые различия между дневными и ночными концентрациями CO<sub>2</sub> регистрируются в апреле и октябре, но только на высотах 4, 52 и 92 м. Кажущийся сигнал фотоассимиляционной активности (а именно снижение концентрации CO<sub>2</sub>) в эти месяцы не соответствует фенологическому состоянию растительности района исследований, которая находится в состоянии покоя.

Данный факт, вероятно, указывает на регистрацию на мачте обсерватории “ZOTTO” процессов секвестирования углерода атмосферы в наземных экосистемах, удаленных (главным образом, южных и западных) регионов Евразии, где начало и окончание активного биосферно-атмосферного газообмена CO<sub>2</sub> сдвинуто на 2 – 3 недели (Pora et al., 2010; Haszpra and Barcza, 2010; Vermeulen et al., 2011).

Возможно, что при отсутствии фотосинтетической активности растительного покрова лесных экосистем в апреле и октябре, концентрация CO<sub>2</sub> возрастает у поверхности земли в ночное время за счет эмиссии диоксида углерода из почвы, выделяемого при гетеротрофном дыхании, как это было показано ранее (Шибистова и др., 2002; Eneroth et al., 2003). Однако, несмотря на то, что слабая эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы (0.1 – 0.15 мкмоль/м<sup>2</sup>/сек, Шибистова и др., 2002) происходит на протяжении всего холодного периода года, в суточной динамике атмосферного CO<sub>2</sub> она отчетливо регистрируется лишь в апреле и октябре. В это время режим светового дня отличается от зимнего, что способствует поддержанию динамики ПСА, приводящей к вертикальному перемешиванию воздуха в данном слое и формированию ночных инверсий.

С наступлением вегетационного периода (май) величина суточных колебаний концентрации CO<sub>2</sub> вблизи подстилающей поверхности (4 м) возрастает до 4.5 млн<sup>-1</sup>, при этом также регистрируются достоверные различия между дневными и ночными концентрациями CO<sub>2</sub> на остальных высотах (например, 1.8 млн<sup>-1</sup> на 301 м,  $p < 0.05$ ). Эти изменения обусловлены началом фотоассимиляционной активности растительности в районе исследования. Так, дневные концентрации CO<sub>2</sub> снижаются за счет усиливающегося поглощения растительностью CO<sub>2</sub> из атмосферы, а ночные имеют тенденцию увеличения, что свидетельствует как об активизации автотрофного дыхания, так и гетеротрофного звена экосистем (Shibistova et al., 2002).

Максимальная амплитуда суточного хода концентрации CO<sub>2</sub> наблюдается вблизи подстилающей поверхности (4 м) в июле – августе, достигая в среднем 21.2±5 млн<sup>-1</sup> (2009-2014 гг.), и постепенно сокращаясь с увеличением высоты до

4.8 млн<sup>-1</sup> (301 м) (Тимохина и др., 2015). Необходимо отметить, что суточная амплитуда в содержании диоксида углерода нами определялась как разница между ее максимальными (раннее утро) и минимальными (послеполуденное время) значениями. Полученное значение суточной амплитуды концентрации CO<sub>2</sub> вблизи подстилающей поверхности над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири хорошо согласуется с таковой, показанной в рамках российско-японского проекта “JR-STATION” для различных районов Западной Сибири, где она варьирует от 15 до 20 млн<sup>-1</sup> (Аршинов и др., 2009). Хотя необходимо отметить, что для отдельных станций этой сети (например, «Березоречка», Томская область) отмечаются и существенно более высокие значения – 50 млн<sup>-1</sup>, а в отдельные годы 62 млн<sup>-1</sup>, что объясняется высокой дыхательной активностью гетерогенной подстилающей поверхности (Watai et al., 2010). Наблюдаемая, относительно невысокая, амплитуда концентрации CO<sub>2</sub> на высоте 301 м обусловлена, главным образом, поступлением в утренние часы восходящих потоков воздуха с высоким содержанием CO<sub>2</sub> в верхние слои (см. ниже).

Амплитуда суточного хода концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в теплое время года наряду с газообменом также обусловлена образованием устойчивого ПСА (Bakwin et al., 1998; Haszpra et al., 1999; Higuchi et al., 2003; Kozlova et al., 2008; Popa et al., 2010; Watai et al., 2010; Winderlich et al., 2010; Vermeulen et al., 2011; Chen et al., 2013; Sasakawa et al., 2013; Zhang et al., 2013). Так, с наступлением темного времени суток приземный воздух быстро охлаждается при остывании поверхности земли, что приводит к формированию стабильной температурной инверсии, уменьшению скорости ветра и, следовательно, интенсивности перемешивания. В летнее время этот слой характеризуется малой высотой, обычно не превышающей 150 – 200 м (Bakwin et al., 1998), и низкой вертикальной диффузией CO<sub>2</sub>.

С помощью модели HYSPLIT, доступной через интернет (Air Resources Laboratory), нами была рассчитана средняя за месяц высота ПСА отдельно в дневное (конвективный слой) и ночное (устойчивый слой) время для каждого

месяца 2009 года местоположения обсерватории “ZOTTO” (рисунок 4.2). В рамках рассматриваемой модели высота ПСА определяется условием равенства нулю турбулентной кинетической энергии (Зинченко и др., 2008). Так, выявлено, что среднемесячная высота устойчивого слоя для летнего времени в 2009 году варьировала от  $166 \pm 34$  до  $205 \pm 27$  м, поэтому измерения, проводимые на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”, позволяют апробировать остаточный слой атмосферы. Этот слой, формируемый ночью выше устойчивого, характеризуется уровнем концентрации  $\text{CO}_2$  предыдущего дня.

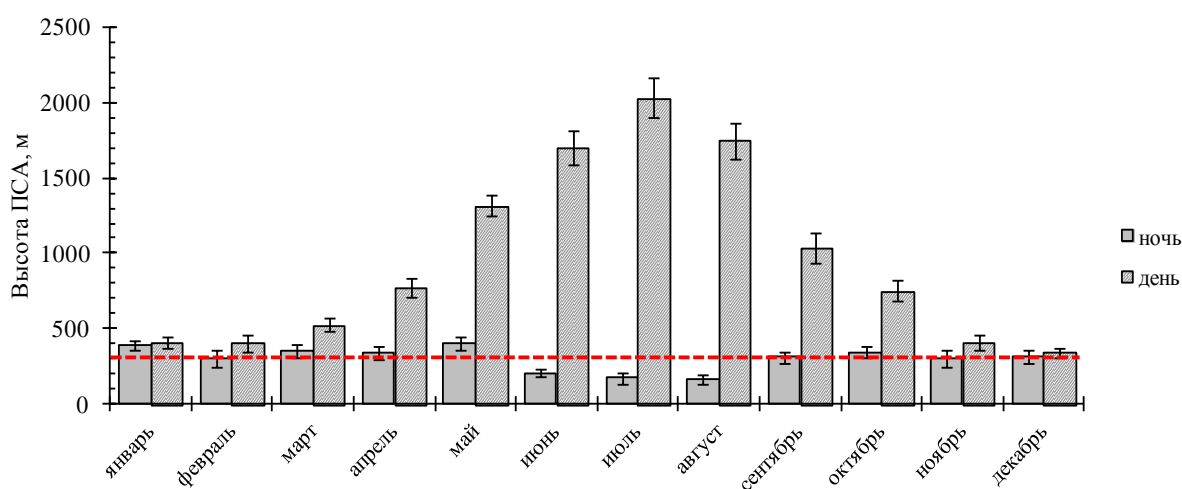


Рисунок 4.2 – Средняя за месяц высота ПСА на примере 2009 году. Красной пунктирной линией отмечена высота мачты обсерватории “ZOTTO” (301 м). Данные получены с электронного источника: Air Resources Laboratory.

Содержание диоксида углерода внутри устойчивого слоя в ночные часы постепенно возрастает за счет выделения  $\text{CO}_2$  (более тяжелого газа, чем атмосферный воздух) в процессе дыхания компонентов экосистемы и прекращения фотосинтеза. Максимальные концентрации  $\text{CO}_2$  в ПСА регистрируются вблизи подстилающей поверхности (4 м) ранним утром (6:00 – 7:00 ч.), после чего они снижаются. Мы можем предположить, что это снижение в содержании  $\text{CO}_2$  обусловлено, главным образом, запуском фотосинтеза и, соответственно, поглощением накопленного за ночь атмосферного  $\text{CO}_2$ . В качестве косвенного доказательства этой гипотезы

служит смещение в максимальных суточных пиках концентраций атмосферного  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (рисунок 4.3).

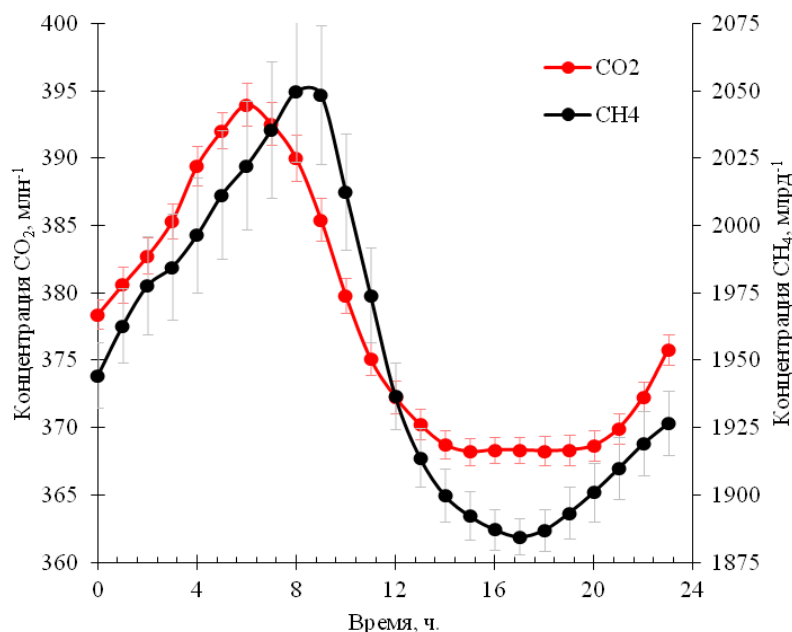


Рисунок 4.3 – Средний суточный ход концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на высоте 4 м в июле 2009 года, также приведены стандартные ошибки.

Необходимо отметить, что содержание  $\text{CH}_4$  в районе обсерватории “ZOTTO” измеряется одновременно с  $\text{CO}_2$  одним газоаналитическим комплексом. Уровень  $\text{CH}_4$ , который не зависит от суточных ритмов растительности, начинает понижаться на 2-3 часа позже по сравнению с  $\text{CO}_2$ , когда нагревается поверхность земли, что приводит к разрушению температурной стратификации ПСА и развитию конвективного перемешивания (Тимохина и др., 2015). Данная закономерность в поведении суточного хода концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  отмечается также на станциях в Западной Сибири (Sasakawa et al., 2013).

В течение нескольких утренних часов, обычно до 12:00 – 13:00 ч., накопленный за ночь  $\text{CO}_2$  активно перемешивается в пограничном слое и дополнительно поглощается в процессе фотосинтеза. При этом скорость перемешивания существенно различается в зависимости от высоты: так, на 4 м снижение концентрации  $\text{CO}_2$  начинается в 6:00 ч. и ее убыль составляет ~2.4



млн<sup>-1</sup>/ч., на 52 м – около 7:00 ч. (~2.0 млн<sup>-1</sup>/ч.), а на 301 м – не раньше 10:00 ч. (0.8 млн<sup>-1</sup>/ч.). Данная задержка во времени связана с развитием конвекции и выносом приземного воздуха с повышенной (за ночь) концентрацией CO<sub>2</sub> в верхний слой атмосферы.

Интенсивное снижение концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> продолжается до 13:00 ч. Минимальные суточные концентрации CO<sub>2</sub> наблюдаются во второй половине дня (13:00 – 17:00 ч.) практически одновременно по всему профилю за счет равномерного вертикального перемешивания воздуха во всей толще конвективного ПСА. Именно поэтому, главным образом, для исследования годового распределения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> (рассмотрены в главе 5) используются среднесуточные концентрации, включающие только дневные измерения CO<sub>2</sub>, полученные с 13:00 до 17:00 ч. Высота конвективного слоя в дневной период достигает 1500 – 2500 м (Lloyd et al., 2002), а в районе обсерватории “ZOTTO” в июле 2009 г. (по данным модели HYSPLIT) – 2037±213 м. Отметим также, что в дневной период формируется незначительный обратный (-0.2 млн<sup>-1</sup>) вертикальный градиент концентрации CO<sub>2</sub>, что свидетельствует о поглощении растительным покровом CO<sub>2</sub>, выделенного в ночной период.

В районе исследования со второй половины августа и в сентябре эмиссия CO<sub>2</sub> с подстилающей поверхности превышает его поглощение в процессе фотосинтеза (Lloyd et al., 2002). Данный факт отражается в постепенном нарастании содержания CO<sub>2</sub> днем, а разница между ночными и дневными концентрациями CO<sub>2</sub> становится менее выраженной (12.0 и 2.1 млн<sup>-1</sup> на 4 и 301 м соответственно).

В холодный период (ноябрь – февраль) концентрации CO<sub>2</sub> не изменяются в течение суток, однако часто регистрируются различия в содержании диоксида углерода по вертикальному профилю, которые сохраняются на протяжении нескольких суток. Эти различия обусловлены, главным образом, периодическим действием барических образований атмосферы, например Сибирского антициклона (Watai et al., 2010; Sasakawa et al., 2010). Под его

воздействием формируются особые метеорологические условия. Так, например, в период с 12 по 18 декабря 2011 г. в районе обсерватории “ZOTTO” наблюдалось высокое атмосферное давление (выше 1020 гПа) и устойчивая температурная инверсия (разница в температуре воздуха между нижней и верхней высотами составляла более 10° С), свидетельствующие о влиянии антициклона в данном регионе (рисунок 4.4). Наблюдаемое при показанных условиях расслоение приземной атмосферы приводит к образованию, так называемых, «верхних и нижних слоев» (Kozlova et al., 2008) с ограниченным перемешиванием. Как следствие, на высотах до 156 м наблюдается существенное увеличение содержания диоксида углерода (+20 млн<sup>-1</sup>) по сравнению с величинами на высотах 227 м и 301 м. Интенсивный рост концентрации CO<sub>2</sub> внутри инверсионного слоя в зимний период может определяться комплексом различных причин, при этом все они остаются слабо изученными. Так, увеличение CO<sub>2</sub> может быть обусловлено его накоплением около поверхности земли за счет зимней гетеротрофной эмиссии. В своей работе К. Eneroth и др. (2003) оценили, что в районе обсерватории “ZOTTO” при величине дыхания наземных экосистем в холодное время около 0.1 – 0.2 мкмоль/м<sup>2</sup>/сек (Arneeth et al., 2002; Shibistiva et al., 2002) накопление вблизи поверхности земли может составлять до 2.6 млн<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> в день. Влияние антропогенных источников также несущественно, поскольку при наблюдаемых метеорологических условиях региональный перенос CO<sub>2</sub> из промышленных районов подавлен из-за отсутствия ветра (Winderlich, 2012).

Кроме того Е. Kozlova и др. (2008) по измерениям на обсерватории “ZOTTO” показали, что при температурных инверсиях в этот период года увеличения концентрации угарного газа (главный показатель сжигания биомассы и ископаемого топлива) не наблюдается. Этот факт исключает влияние локального CO<sub>2</sub>, транспортируемого из ближайших населенных пунктов в период отопительного сезона. Дополнительно, одной из предполагаемых причин увеличения концентрации CO<sub>2</sub> около поверхности земли могут быть физические процессы. Увеличение концентрации CO<sub>2</sub> на

нижних высотах (4 и 52 м) обычно сопровождается ее одновременным снижением (однако, оно не так сильно проявлено) на верхних (227 и 301 м) высотах, поэтому, вероятно, в ПСА по направлению к земной поверхности может происходить, например, физическое расслоение газов за счет диффузии газов с различной молекулярной массой (Winderlich, 2012).

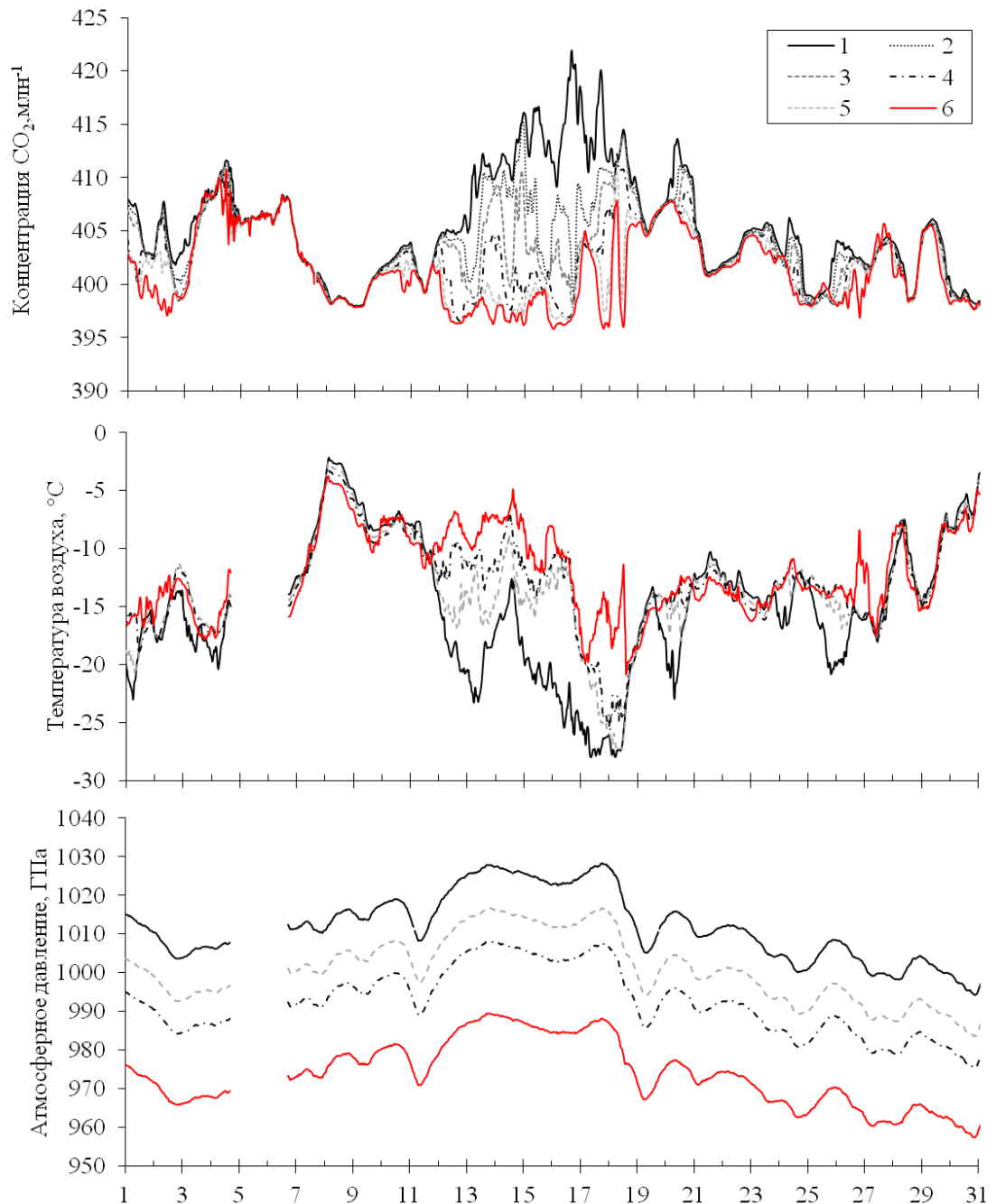


Рисунок 4.4 – Концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере на разных высотах в зимний период (декабрь 2011 года), обусловленные синоптическими явлениями (сибирский антициклон). 1 – 6 – высота измерительного уровня в градации 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м, соответственно.

## 4.2. Оценка суммарной эмиссии CO<sub>2</sub> из наземных экосистем

Непрерывные измерения концентрации CO<sub>2</sub>, проводимые в режиме, когда отбор проб воздуха осуществляется как по профилю устойчивого пограничного слоя (ночь), так и в остаточном слое (где содержание CO<sub>2</sub> относительно постоянно на протяжении суток) атмосферы, позволяют рассчитать обменные потоки CO<sub>2</sub> между наземными экосистемами и атмосферой в пределах зоны охвата обсерватории “ZOTTO” (Yi et al., 2000; Aubinet et al., 2005; Feigenwinter et al., 2008).

Для определения обменных потоков CO<sub>2</sub> нами применялся расчётный метод, разработанный J. Winderlich и др., (2014), в котором были использованы градиентные измерения концентрации CO<sub>2</sub>, температуры воздуха и атмосферного давления на высотах 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м. Теоретической основой используемого метода являлась теория турбулентности, применяемая к прямым оценкам энерго- и массообмена между экосистемой и атмосферой (метод пульсационных наблюдений) (Baldocchi et al., 1988).

Базовые физические уравнения метода включают законы сохранения импульса, энергии, массы и уравнения турбулентного переноса, которые будут рассмотрены ниже.

Поток субстанции ( $S$ ) исследуемого газа (любая малая, газовая составляющая атмосферы – CO<sub>2</sub>, метан, оксиды азота и другие) на некоторой высоте над поверхностью, в определенном объеме атмосферы, согласно закону сохранения массы, в дифференциальной форме определяется как функция зависимости времени ( $T$ ) от места ( $x, y, z$ ) (Baldocchi et al., 1988):

$$S(t, x, y, z) = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} + D \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2}, \quad (4.1)$$

где,  $u, v, w$  - это компоненты скорости ветра по двум горизонтальным осям ( $x$  и  $y$ ), перпендикулярным друг другу, и одной вертикальной осью ( $z$ ), соответственно, и  $c$  – концентрация исследуемого газа.

Вторым базовым уравнением, рассматриваемым ниже, является уравнение вертикального потока. Оно приведено в конечной форме, в соответствии с расчетами, представленными в работах Yi et al. (2000); Aubinet et al.(2005); Feigenwinter et al.(2008). Турбулентный поток исследуемого газа может быть определен как:

$$F = \int_0^{z_r} \frac{1}{V_m} s(t, z) dz + \left( \frac{1}{V_m} \cdot \overline{w'c'} \right)_{z=0}, \quad (4.2)$$

где,  $V_m(z) = M_{Air}/\rho_{Air}(z)$ ,  $z_r$  – высота контрольного объема атмосферы,  $M_{Air}$  – относительная молярная масса воздуха,  $\rho$  – плотность воздуха, рассчитанная по формуле:

$$p = \frac{P \cdot M}{R \cdot T},$$

где,  $P$  – давление воздуха (Па),  $R$  – универсальная газовая постоянная (8,3144 Дж/моль\*К),  $T$  – температура воздуха (°К),  $M$  – относительная молярная масса воздуха.

Далее применялся ряд комбинаций уравнений (4.1) и (4.2), следуя усреднениям Рейнольдса, где каждую переменную представляют в виде суммы среднего (обозначенного чертой) и отклонения или пульсации (обозначенного штрихом):  $u = \bar{u} + u'$ , и так далее.

Таким образом, были получены следующие компоненты базовой формулы (4.3) метода:

$$\begin{aligned}
 F &= \int_0^{z_r} \frac{1}{V_m} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz && \text{Аккумуляция (} F_{stor} \text{)} \\
 &+ \frac{1}{V_m} \cdot \overline{w'c'}(z_r) && \text{Микровихревые пульсации (} F_{Eddy} \text{)} \\
 &+ \bar{w}(z_r) \cdot \left( \frac{1}{V_m} \cdot \bar{c}(z_r) - \frac{1}{z_r} \int_0^{z_r} \frac{1}{V_m} \cdot \bar{c}(z) dz \right) && \text{Вертикальная адвекция (} F_{vAdv} \text{)} \\
 &+ \int_0^{z_r} \frac{1}{V_m} \cdot \left( \bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial y} \right) dz && \text{Горизонтальная адвекция (} F \text{)}
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Компонента  $F_{stor}$  в уравнении (4.3) описывает количество  $\text{CO}_2$ , аккумулированного за определенный интервал времени ниже наблюдаемой высоты  $z_r$ . Как было показано выше, накопление  $\text{CO}_2$  происходит преимущественно ночью, в условиях малой турбулентности (низкая скорость ветра), когда формируется устойчивый ПСА. Главным источником поступлений  $\text{CO}_2$  в стратифицированном слое является его выделение при дыхании различных компонентов наземных экосистем в районе обсерватории “ZOTTO”. Поэтому, в ночной период, компонента аккумулирования ( $F_{stor}$ ) в уравнении (4.3) является основной составляющей.

Процесс накопления  $\text{CO}_2$  можно представить, как трапециевидную фигуру между 30 минутными измерениями концентрации  $\text{CO}_2$  в момент времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  и смежными измерительными высотами мачты (рисунок 4.5). Компонента аккумулирования ( $F_{stor}$ ) в уравнении (4.3) раскладывается в виде суммы приведенной ниже:

$$F_{stor}(t_i, z_h) = \int_{z_{h+1}}^{z_h} \frac{1}{V_m} \cdot \frac{\partial \bar{c}(t_i)}{\partial t} dz = \int_{z_{h+1}}^{z_h} \frac{\rho_{Air}(z)}{M_{Air}} \cdot \frac{\partial \bar{c}(t_i)}{\partial t} dz \quad (4.4)$$

$$= \sum_{h=1}^5 \frac{1}{2} \frac{(\rho_h + \rho_{h+1})}{M_{Air}} \cdot \frac{((c_h(t_{i+1}) - c_h(t_i)) + (c_{h+1}(t_{i+1}) - c_{h+1}(t_i)))}{t_{i+1} - t_i} \cdot (\dots)$$

где,  $\rho$  есть плотность воздуха,  $c$  – концентрация  $\text{CO}_2$ ,  $z$  – высота измерений, индекс  $h = 1 \dots 6$  обозначает измерительный уровень мачты: 4 м, 52 м, 92 м, 156 м, 227 м и 301 м, индекс  $i$  указывает на временной интервал между измерениями (30 минут).

Ночные изменения концентрации  $\text{CO}_2$  на высоте 301 м обсерватории “ZOTTO” свидетельствуют о том, что некоторое количество  $\text{CO}_2$  может проникать из устойчивого пограничного слоя в вышележащий – остаточный слой (Winderlich et al., 2010). В используемом методе расчета эти потери  $\text{CO}_2$  учитывались при оценке компонент микровихревых пульсаций ( $F_{Eddy}$ ) и адвекции ( $F_{vAdv}$  и  $F_{Adv}$ ). Компоненты адвекции зависят от топографических характеристик и типа подстилающей поверхности, при этом вертикальная составляющая адвекции компенсируется, главным образом, ее горизонтальной

компонентой. Однако, из-за отсутствия достаточной информации о горизонтальном распространении концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , компонента горизонтальной адвекции исключалась из общей суммы уравнения (4.3). При таком исключении одной из компонент адвекции могут возникнуть серьезные ошибки в расчете  $F$ , поэтому нами была также исключена и вторая компонента – вертикальная адвекция. Аналогичный подход использовался в подобных расчетах на других высотных мачтах (Davis et al., 2003; Haszpra et al., 2005). Таким образом, оценки  $F$  включали только суммирование компонентов  $F_{stor}$  и  $F_{Eddy}$ . В данном исследовании разница в концентрации  $\text{CO}_2$  между поверхностью почвы и первым измерительным уровнем (4 м) принималась как константа. Детализированное описание представленного метода расчета  $F$  дано в работе (Winderlich et al., 2014).

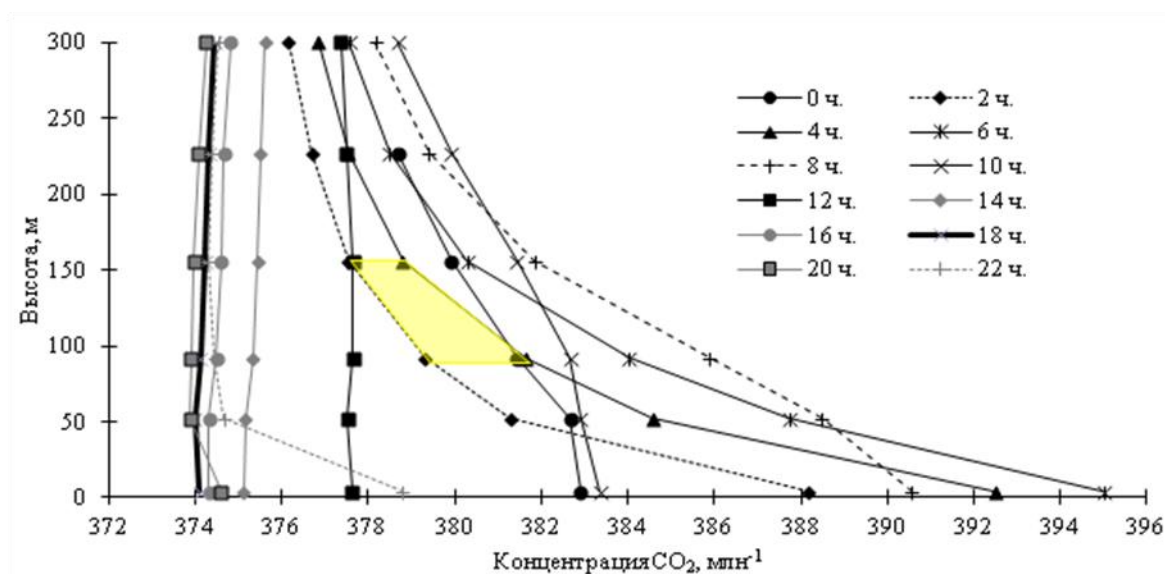


Рисунок 4.5 – Среднемноголетний (2009-2014 гг.) вертикальный градиент концентрации  $\text{CO}_2$  в течение суток в июле (усреднение за 2 ч.: 0:00-22:00). Желтая область представляет трапецию, которая иллюстрирует накопление  $\text{CO}_2$  между 92 и 156 м с 2:00 до 4:00 ч. местного времени.

Недостатком используемого расчетного метода является неточная оценка обмена  $\text{CO}_2$  в дневное время, представляющего преимущественно ассимиляционный процесс: во-первых, из-за отсутствия накопления



(компонента  $F_{stor}$ ) в результате конвективного перемешивания приземной атмосферы и, во-вторых, недооценки турбулентных потоков (компоненты  $F_{Eddy}$ ) в период их максимальных значений (дневное время). Тем не менее, J. Winderlich et al. (2014), несмотря на ограничения этого метода, оценили среднее дневное поглощение  $CO_2$ . Так, в июле 2009 года в первой половине дня оно составляло 8  $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ , а в остальные месяцы было ниже. Однако в настоящей работе были использованы только оценки  $F$ , полученные в ночное время.

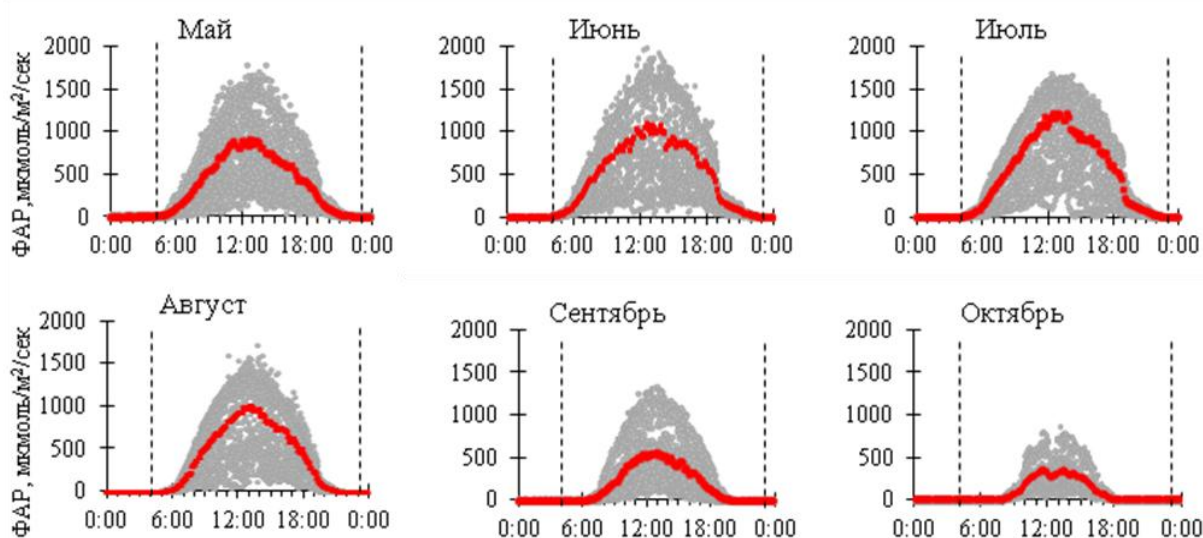


Рисунок 4.6 – Суточная динамика фотосинтетической радиации (ФАР) с мая по октябрь 2009 г. в районе исследования. Серые точки обозначают среднее количество ФАР, пришедшее на поверхность за 10 минут; красные точки показывают суточный ход ФАР, усредненный для соответствующего месяца; вертикальные линии указывают на границы окончания (4:00 ч.) и начала (23:00 ч.) ночного периода, выбранного для нашего исследования.

Ночным периодом в нашей работе являлось время суток, когда величина фотосинтетической активной радиации (ФАР) была менее 30  $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ . Как видно на рисунке 4.6 этот период в районе исследования различается для каждого месяца вегетационного сезона, при этом он наиболее короткий в июне – июле, продолжительностью 5 часов – с 23:00 ч. до 4:00 ч., поэтому для корректных оценок эмиссионных потоков  $CO_2$  был выбран именно этот



промежутков времени суток. В темное время суток при низких значениях ФАР (менее  $30 \text{ мкмоль/м}^2/\text{сек}$ ) фотоассимиляция углерода очень низкая, поэтому поток  $\text{CO}_2$ , получаемый для ночного периода времени (с 23:00 ч. до 4:00 ч.), представляют собой суммарную ночную эмиссию  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем в зоне охвата (футпринт) обсерватории “ZOTTO”. Таким образом, в нашей работе под термином суммарная ночная эмиссия  $\text{CO}_2$  подразумевается выделение углерода в результате как автотрофного (дыхание надземной и подземной частей растительности), так и гетеротрофного (минерализация почвенного органического вещества микроорганизмами) дыхания.

В результате проведенных расчетов получена оценка суммарной ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем в футпринте обсерватории “ZOTTO” с мая 2009 по октябрь 2013 гг. (рисунок 4.7).

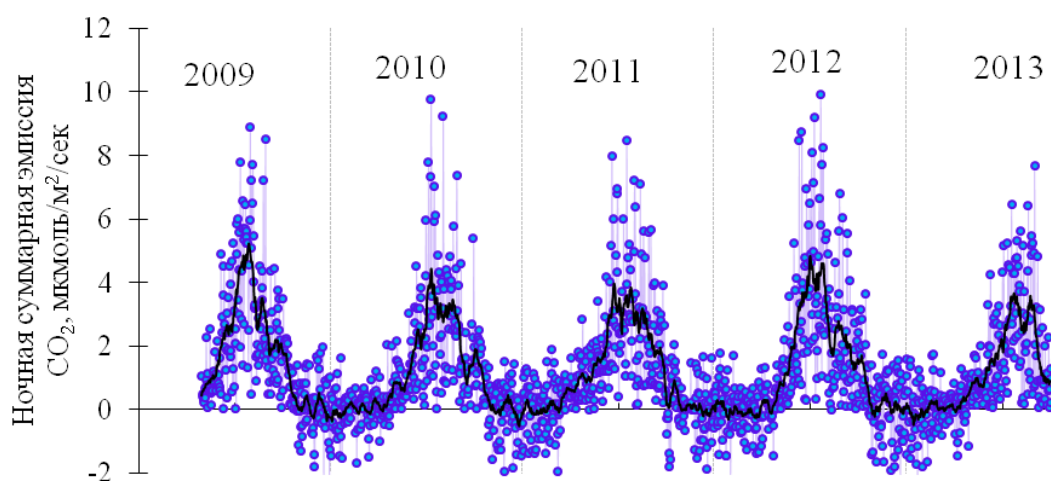


Рисунок 4.7 – Ночная суммарная эмиссия  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем в футпринте обсерватории “ZOTTO”. Синие точки обозначают суммарную эмиссию  $\text{CO}_2$  для каждой ночи (23:00 – 4:00 ч.) исследуемого периода, черная кривая – аппроксимация суточного хода ночного эмиссии  $\text{CO}_2$  скользящей средней с окном сглаживания 15 дней.

Аппроксимирующая (черная) кривая на рисунке 4.7 свидетельствует о том, что рост ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем района обсерватории “ZOTTO” регистрируется уже ранней весной. Так, в 2010, 2012 и 2013 годах она начала возрастать с середины апреля (10-20 числа месяца), а в 2011 году –

на месяц раньше (с середины марта). Усиление выделения  $\text{CO}_2$  в весенний период обусловлено увеличением микробиологической активности почвенной биоты из-за прогревания почвы до  $0^\circ\text{C}$  на глубине более 128 см и возросшей доступностью влаги в результате начала снеготаяния (рисунок 4.8). Тем не менее, величина ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  оставалась низкой, на уровне  $0.2$   $\text{мкмоль/м}^2/\text{сек}$ , и соответствовала показанной ранее в работе О. Shibistova и др. (2002) для сосняков лишайниковых в период снеготаяния ( $0.15$ - $0.25$   $\text{мкмоль/м}^2/\text{сек}$ ).

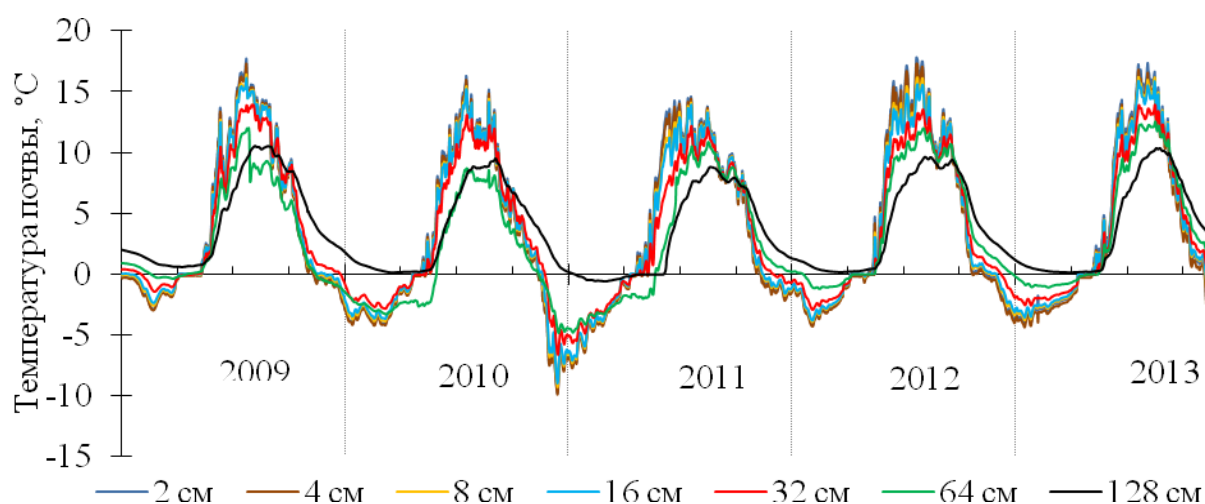


Рисунок 4.8 – Температура почвы на разных глубинах, измеренная на обсерватории “ZOTTO”.

Почти полное прекращение ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем в зоне влияния обсерватории “ZOTTO” наблюдается, когда температура почвы опускается ниже  $0^\circ\text{C}$ . Таким образом, период с интенсивным ночным выделением  $\text{CO}_2$  (выше  $0.15$   $\text{мкмоль/м}^2/\text{сек}$ ) в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири (когда регистрируется его отчетливая сезонная динамика) составляет в среднем 210 дней (расчет выполнен по трем годам (2010 – 2012 гг.)).

Максимальные среднемесячные значения суммарной ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  на протяжении вегетационного сезона наблюдались в июле, хотя в отдельные годы этот пик мог сдвигаться на август, как это отмечалось в 2013

году (рисунок 4.9). За исследуемый нами период наиболее высокая интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  в ночное время регистрировалась в июле 2012 г. ( $4.28 \pm 0.47$  мкмоль/ $\text{м}^2$ /сек). Этот год характеризовался крупномасштабными природными пожарами в непосредственной близости к обсерватории “ZOTTO”, что могло привести к завышению полученной нами величины за счет дополнительного поступления  $\text{CO}_2$  при горении. Стоит, однако, заметить, что в июле 2009 года, когда отсутствовали пожарные эмиссии  $\text{CO}_2$ , интенсивность ночного выделения  $\text{CO}_2$  ( $4.15 \pm 0.36$  мкмоль/ $\text{м}^2$ /сек) достоверно не отличалась ( $P < 0.05$ ) от такого в июле 2012 г. Самая низкая скорость выделения  $\text{CO}_2$  в ночное время за исследуемый период прослеживалась в августе 2013 г., составляя  $2.95 \pm 0.32$  мкмоль/ $\text{м}^2$ /сек, что 1.4 раз ниже, чем в июле 2009 г. Эти факты свидетельствует о том, что респираторный процесс имеет высокую межгодовую вариабельность, вероятно, обусловленную климатическими факторами. В октябре ночная эмиссия  $\text{CO}_2$  в футпринте обсерватории “ZOTTO” составляла около 1 мкмоль/ $\text{м}^2$ /сек, в ноябре снижалась до 0 – 0.2 мкмоль/ $\text{м}^2$ /сек и оставалась на этом уровне в течение всех зимних месяцев. Рассчитанная нами величина зимней эмиссии  $\text{CO}_2$  соответствовала таковой, полученной методом микровихревых пульсаций для сосняков лишайниковых, произрастающих в районе обсерватории “ZOTTO” (Shibistova et al., 2002).

На рисунке 4.9 представлено сравнение сезонного хода суммарной ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем с ночным дыханием трех лесных биогеоценозов, произрастающих в непосредственной близости к обсерватории “ZOTTO”, полученным С. Roser и др. (2002) на основе измерений экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена методом микровихревых пульсаций в 2000 году. Эти лесные экосистемы находились на разных этапах сукцессионного развития: 50-летний березняк (*Betula pubescens*) с примесью пихты и ели в подросте; смешанный древостой, состоящий из 250-летних пихты (*Abies sibirica*), ели (*Picea obovata*) и сосны (*Pinus sibirica*) с включениями перестойных насаждений березы; и 200-летний пихтарник (*Abies sibirica*).

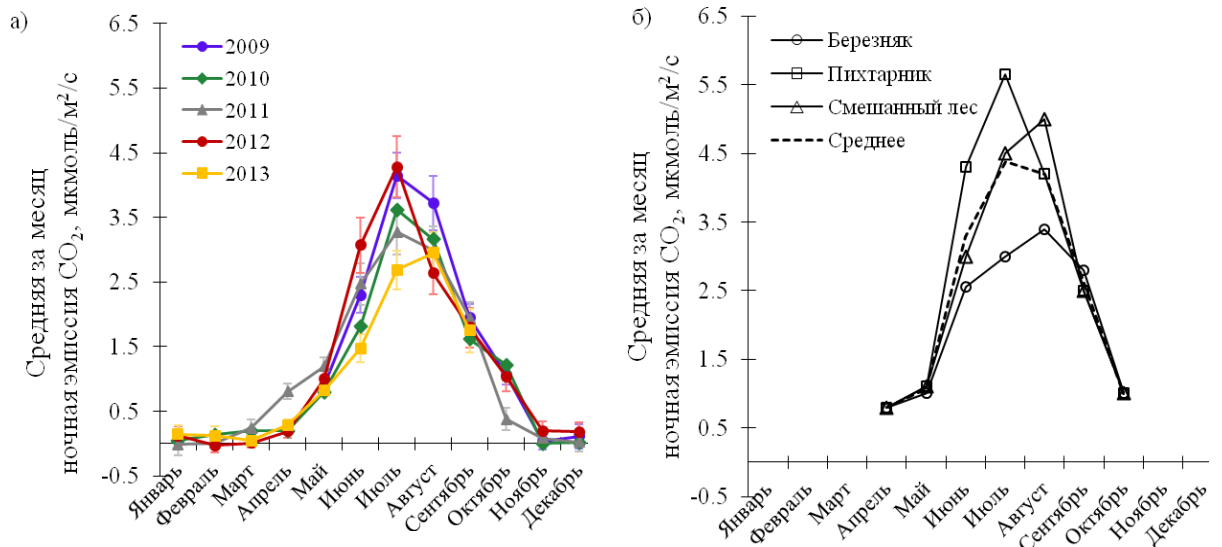


Рисунок 4.9 – а) сезонный ход суммарной ночной эмиссии CO<sub>2</sub> наземными экосистемами в зоне влияния обсерватории “ZOTTO” с 2009 по 2013 гг.; б) ночное дыхание отдельных биогеоценозов в 2000 году, произрастающих в районе обсерватории “ZOTTO”: березняк, пихтарник и смешанный лес, а также их среднее значение (Roser et al., 2002).

Сравнительный анализ показал, что ночное дыхание темнохвойного леса и березняка начинает регистрироваться также в апреле, однако его величина в 2000 г. была в два раза выше ( $0.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{сек}$ ), чем полученная нами для этого же месяца (около  $0.37 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{сек}$ ), за исключением 2011 года, когда разницы практически не отмечалось. Высокая интенсивность выделения CO<sub>2</sub> в ночной период 2011 года в районе обсерватории “ZOTTO” может быть обусловлена очень ранним наступлением весны. Так, среднемесячная температура воздуха в апреле 2011 г. составляла  $3.3^\circ \text{C}$ , что практически в два раза выше среднемноголетнего показателя ( $-2.8^\circ \text{C}$ ). Наибольшие различия в величине ночного дыхания среди трех лесных экосистем, находящихся на разных этапах сукцессионного развития, проявились в центральные месяцы вегетационного сезона. Так, в июле ночное выделение CO<sub>2</sub> в пихтарнике ( $5.65 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{сек}$ ) было практически в два раза выше, чем в березняке ( $3 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{сек}$ ). Однако, на протяжении всего вегетационного сезона средние значения суммарного ночного дыхания в трёх типах биогеоценозов

(пунктирная черная кривая на рисунке 4.9), представленных в работе С. Roser и др. (2002), находились на уровне самых высоких среднемесячных значений суммарной ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  в наземных экосистемах района обсерватории “ZOTTO”, полученными за исследуемые пять лет.

Одним из ведущих экологических факторов, контролирующих респираторный процесс в экосистемах, является температура, поскольку все физические и физиолого-биохимические процессы жизнедеятельности в растениях и почве термически зависимы. Температура почвы определяет выделение  $\text{CO}_2$  из почвы, а температура воздуха – преимущественно автотрофное дыхание наземных частей экосистем (ствол, листья и хвоя). По результатам исследований, проведенным О. Shibistova и др. (2002) в сосняках лишайниковых среднетаежной подзоны Сибири, расположенных в непосредственной близости к обсерватории “ZOTTO” (около 10 км) было показано, что вклад почвенного дыхания в суммарное дыхание экосистем составляет 61%, тогда как дыхание ствола и листьев (хвои) – 21% и 18 % соответственно. Дневное дыхание лесных экосистем принято рассчитывать на основе температурной параметризации значений экосистемного дыхания в ночные часы (Shibistova et al., 2002; Lloyd et al., 2002). Поэтому, для получения суммарной эмиссии  $\text{CO}_2$  наземными экосистемами, которая включает как дневную, так и ночную эмиссию  $\text{CO}_2$ , была выбрана температура почвы на глубине 4 см, которая регистрируется на обсерватории “ZOTTO” (рисунок 4.8). Температурная зависимость ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  в наземных экосистемах, параметризованная в соответствии с уравнением Ллойда-Тейлора (4.5), представлена на рисунке 4.10.

$$R = R_{10} \cdot \exp\left(308.56 \cdot \left(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T-227.13}\right)\right), \quad (4.5)$$

где  $R_{10}$  – ночное дыхание наземных экосистемы при температуре  $283.15^\circ \text{K}$  ( $10^\circ \text{C}$ ),  $T$  – температура почвы на глубине 4 см в  $^\circ\text{K}$ , измеренная каждый час,  $56.02^\circ \text{K}$  – энергия активации Аррениуса (Lloyd and Taylor, 1992).

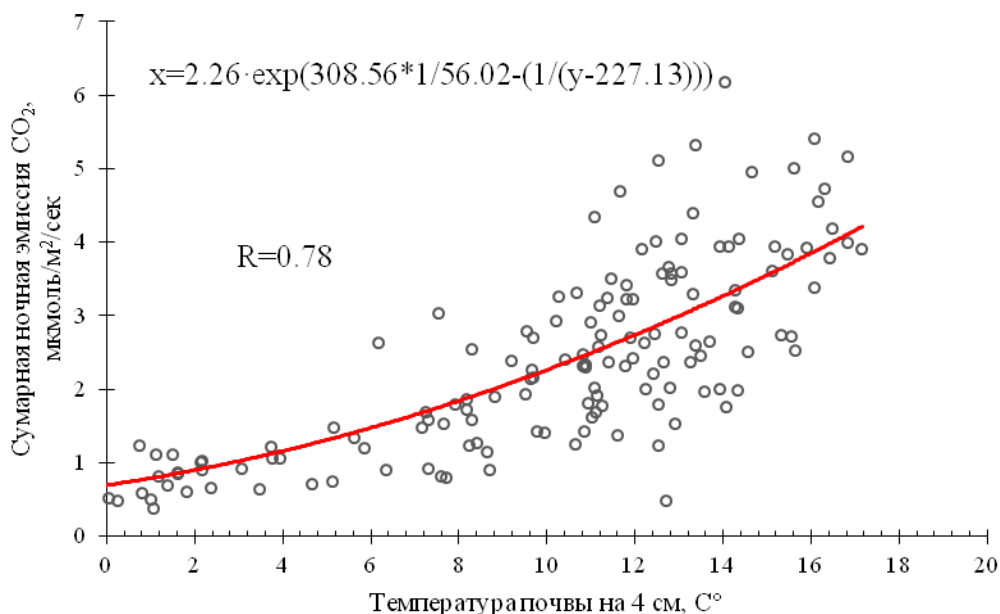


Рисунок 4.10 – Температурная зависимость ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  в наземных экосистемах зоны влияния высотной мачты обсерватории “ZOTTO” от ночной температуры почвы на глубине 4 см. Точками представлена пятидневная средняя ночная эмиссия  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем и температура почвы для пяти (2009 – 2013 гг.) вегетационных периодов (мая – октябрь).

Величина ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем при температуре почвы равной  $10^\circ\text{C}$  ( $R_{10}$ ) на основе уравнения (4.5) составила  $2.26 \pm 0.06$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ . Полученное нами значение  $R_{10}$  превышает таковые, приведенные ранее для сосняков лишайниковых среднетаежной подзоны Сибири ( $1.49$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ ), мезо-олиготрофных болот таежной зоне Средней Сибири ( $0.98$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ ) и Европейского северо-востока России ( $1.43$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ ), которые были оценены на основе исследований экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена методом микровихревых пульсаций (Шибистова и др. 2002; Arneth et al., 2002; Михайлов, 2013). Однако, оно, оказалось близко аналогичному значению ( $2.52$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{сек}$ ), представленному для сосняков лишайниковых, произрастающих в Восточной Финляндии (Niinisto et al., 2011). На основе литературного анализа выявлено, что значение коэффициента  $R_{10}$  в уравнении (4.5) для разных типов экосистем бореального пояса, варьирует в

широких пределах от 0.5 до 5 мкмоль/м<sup>2</sup>/сек (Silvola et al., 1996). Таким образом, приведенное нами значение  $R_{10}$  сопоставимо с опубликованными данными и может быть использовано в последующих расчетах.

Полученная температурная зависимость ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  в соответствии с уравнением Ллойда-Тейлора (4.5) была использована для определения суточной эмиссии  $\text{CO}_2$  в наземных экосистемах (рисунок 4.11). При этом нами было принято допущение, что температурная зависимость ночной эмиссии  $\text{CO}_2$  от температуры, полученная для ночного периода, сохраняется таковой и в дневное время.

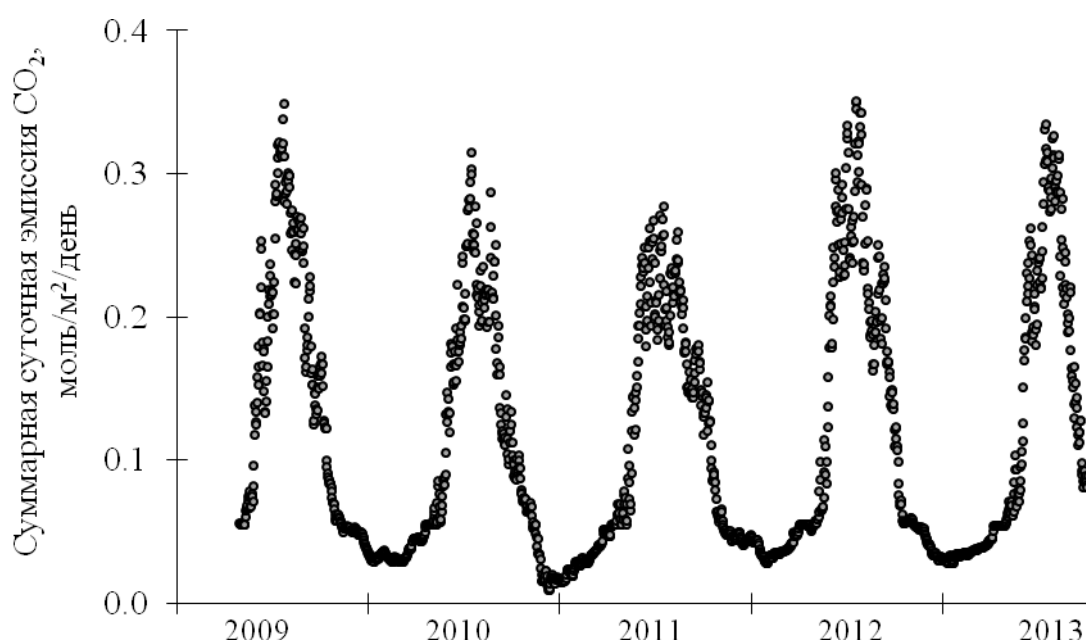


Рисунок 4.11 – Суммарная суточная эмиссия  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем, составляющих зону влияния обсерватории “ZOTTO”.

Затем, мы рассчитали суммарную сезонную (1 мая по 31 октября) и годовую эмиссию  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем на основе формул (4.6) и (4.7), соответственно:

$$R_a = \sum_i^{184} R_i \quad (4.6)$$

$$R_a = \sum_i^{365} R_i, \quad (4.7)$$

где  $R_a$  – суммарная годовая эмиссия  $\text{CO}_2$ ,  $R_i$  – суммарная суточная эмиссия  $\text{CO}_2$   $i$ -ого дня.

Средняя годовая эмиссия  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем, составляющих зону влияния обсерватории “ZOTTO” за три полных года исследований (2010 – 2012 гг.) находилась на уровне  $464.0 \pm 23.5 \text{ гС/м}^2/\text{год}$  с незначительными вариациями по годам (коэффициент вариации 8.7%) (таблица 4.1). Эмиссионный поток  $\text{CO}_2$  за вегетационный период (май – октябрь) пяти лет, по нашим оценкам, составлял в среднем  $366.7 \pm 12.8 \text{ гС/м}^2$  (коэффициент вариации 7%), т.е. 80% всей годовой эмиссии  $\text{CO}_2$ . Остальные  $100 \pm 8 \text{ гС/м}^2$  приходятся на эмиссию в холодный период года.

Таблица 4.1 – Погодичная вариация суммарного дыхания наземных экосистем, составляющих футпринт обсерватории “ZOTTO” за вегетационный сезон и за год, полученная на основе параметризации уравнения Ллойда – Тейлора (4.5)

Год	Моль $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сезон}$	$\text{гС/м}^2/\text{сезон}$	Моль $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{год}$	$\text{гС/м}^2/\text{год}$
2009	31.9	383.3		
2010	27.6	331.4	35.2	422.4
2011	30.2	362.6	38.9	466.8
2012	33.2	398.4	41.9	502.8
2013	29.8	357.6		
Среднее	$30.6 \pm 1.1$	$366.7 \pm 11.5$	$38.7 \pm 2.4$	$464.0 \pm 23.5$

В результате комплексных инвентаризационных исследований, проведенных сотрудниками института Леса им. В.Н. Сукачева в радиусе 100 км вокруг обсерватории “ZOTTO” установлено, что преобладающими типами леса являются ельники и пихтачи зеленомошные (46.0%), березняки и осинники (12.3%), болотные экосистемы (10.5%), сосняки зеленомошные (8.3%), сосняки лишайниковые (7.6%) и кедрачи зеленомошные (1.8%). На вырубке и гари приходится соответственно 2.6 и 5.1% территории (Климченко и др., 2011).



Таблица 4.2 – Выделение CO<sub>2</sub> различными классами земной поверхности в радиусе 100 км от обсерватории “ZOTTO”

Класс земной поверхности	Площадь		Дыхание за сезон		
	тыс. га	%	гС/м <sup>2</sup>	тыс. тС	
Сосняки	499.4	15.9	312	1558	Чебакова и др, 2014
Темнохвойный лес	1502.5	47.8	641	9631	Roser et al., 2002
Лиственные (березняки, осинники)	386.2	12.3	480	1854	Roser et al., 2002
Болота	328.2	10.5	170	558	Arneth et al., 2002
Не растительные поверхности	81.7	2.6	нет данных		
Вода	72.6	2.3	нет данных		
Трава, кустарник	27.3	0.9	нет данных		
Итого	3139.4	100		13601	
Средневзвешенное значение, гСО <sub>2</sub> /м <sup>2</sup>			<b>433</b>		

Для основных типов растительности 100 км радиуса зоны влияния обсерватории “ZOTTO” ранее уже были получены эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> с помощью метода микровихревых пульсаций (Arneth et al., 2002; Lloyd et al., 2002; Shibistova et al., 2002; Roser et al., 2002). Так, для сосняков в работе Н.М. Чебаковой и др. (2014) дыхание экосистемы, рассчитанное на основе эмпирической зависимости от температуры воздуха, составило 312 гС/м<sup>2</sup> за сезон и 66 гС/м<sup>2</sup> – зимой, т.е. на долю последнего приходилось около 18% от годовой величины (378 гС/м<sup>2</sup>/год), что согласуется с нашими оценками. J. Lloyd и др. (2002) оценили дыхание этого же сосняка, с учетом всех его компонентов (почвенное дыхание, дыхание ствола и хвои) в размере 440 гС/м<sup>2</sup>/год, а его варьирование в 1998-2000 гг. согласно О.Б. Шибистойой и др. (2002) составило от 372 до 540 гС/м<sup>2</sup>/год. Выделение CO<sub>2</sub> за вегетационный сезон в березняке (березовый лес с примесью молодняка пихты и ели), согласно данным С. Roser и др. (2002) превышало полученные нами значения на 20-25%, составляя 480 гС/м<sup>2</sup>/сезон, соответственно. Эти значения, однако, в 1.5 – 2 раза ниже, чем

ранее приводимые величины экосистемного дыхания в темнохвойных лесах как Средней Сибири ( $677 \text{ гС/м}^2/\text{сезон}$ ) (Roser et al., 2002), так и бореального пояса Северной Америки ( $900 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ ) (Chen et al., 1999).

Дыхание болот в непосредственной близости к обсерватории в 1998-2000 гг. оценено величиной  $170 \text{ гС/м}^2/\text{сезон}$ , что составляет менее половины эмиссионного потока  $\text{CO}_2$ , рассчитанного нами для всей территории. Тогда как болотные экосистемы в Европейской части России (около поселка Федоровское) выделяют на 66% больше  $\text{CO}_2$  –  $280 \text{ гС/м}^2/\text{сезон}$ , чем в Сибири (район поселка Зотино) (Arneeth et al., 2002).

Исходя из площадей, занимаемых соответствующими типами земного покрова, и приведенных выше оценок их дыхания, нами рассчитана суммарная величина эмиссии  $\text{CO}_2$  за вегетационный сезон из этих экосистем и территории 100 км радиуса футпринта высотной мачты обсерватории “ZOTTO” в целом (таблица 4.2). В результате получено, что общая эмиссия с этой площади ( $31400 \text{ км}^2$ ) составила 13.6 Тг С, а средневзвешенная – около  $433 \text{ гС/м}^2$ , что на 18% превышает полученные нами оценки по градиентным измерениям –  $366.7 \pm 12.8 \text{ гС/м}^2$ . Таким образом, суммарная эмиссии  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем, рассчитанная градиентным методом, хорошо согласуются с оценками, полученными на основе измерений потоков  $\text{CO}_2$  методом микровихревых пульсаций.

### 4.3. Заключение к главе 4

Систематические наблюдения за концентрацией атмосферного  $\text{CO}_2$  в непрерывном режиме по высотному профилю мачты обсерватории “ZOTTO” свидетельствуют о том, что концентрация  $\text{CO}_2$  имеет отчетливый суточный ход, но только в теплое время года (апрель-октябрь), что объясняется биологической активностью растительного покрова зоны влияния обсерватории “ZOTTO” и

динамикой высоты ПСА. Наибольшие изменения суточной амплитуды концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  регистрируются вблизи подстилающей поверхности (на высоте 4 м) в пик вегетационного сезона. С увеличением высоты отбора проб воздуха суточная амплитуда концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  сокращается, отражая снижение локального влияния растительности, поэтому на высоте 301 м она минимальна по сравнению с остальными высотами (52 м, 92 м, 156 м, и 227 м). В холодное время года суточные различия в концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  отсутствуют. Однако отмечаются случаи резкого увеличения содержания диоксида углерода на высотах 4 и 52 м на протяжении нескольких дней, которые не прослеживаются выше. Они обусловлены стратификацией приземной атмосферы под влиянием барических образований атмосферы.

Измерения концентрации  $\text{CO}_2$  и метеорологических параметров (атмосферное давление и температуры воздуха) по профилю высотной мачты позволили рассчитать эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем, произрастающих в зоне влияния обсерватории “ZOTTO”. В течение исследуемых пяти лет (2009-2013 гг.) годовое выделение  $\text{CO}_2$  составило в среднем  $464 \pm 28.5$  г С/м<sup>2</sup> за год ( $366.7 \pm 12.8$  г С/м<sup>2</sup> за вегетационный сезон). Сравнение интенсивности эмиссии  $\text{CO}_2$ , полученной градиентным методом, и респираторных потоков  $\text{CO}_2$  в основных типах биогеоценозов на территории зоны влияния обсерватории “ZOTTO” в радиусе 100 км показало, что применяемый нами метод определения годовой эмиссии  $\text{CO}_2$  адекватно характеризует исследуемую территорию и позволяет получить интегральный показатель интенсивности его выделения.

## ГЛАВА 5. ГОДОВАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO<sub>2</sub>

Годовые колебания концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> определяются прежде всего сезонностью в развитии растительного покрова внетропических районов земного шара (Danning et al., 1995; Nakazawa et al., 1997; Tohjima et al., 2005; Pickers and Manning, 2015). В период вегетации содержание CO<sub>2</sub> снижается благодаря деятельности растительности, а именно – фотосинтетической ассимиляции углерода, а в период покоя, наоборот, возрастает в результате преобладания процессов дыхания над фотосинтезом, либо при полном отсутствии последнего, например, в высоких широтах Северного полушария. Вторым важным фактором, оказывающим влияние на годовое распределение содержания CO<sub>2</sub>, являются процессы глобальной циркуляции атмосферы (Machida et al., 2002; Tohjima et al., 2005). Так, распределение диоксида углерода в широтном направлении осуществляется за очень короткий промежуток времени, обычно в течение 2 – 3 недель, тогда как меридиональный перенос происходит значительно дольше и может продолжаться несколько месяцев (Keeling et al., 1989).

В настоящее время проводится значительное количество систематических измерений концентрации CO<sub>2</sub> на различных континентальных, островных и морских станциях (см. World Data Centre for Greenhouse Gases), которые позволяют получить представление о годовом ходе концентрации CO<sub>2</sub> на глобальном или региональном уровнях. Так, на рисунке 5.1 показана трехмерная модель распределения атмосферного CO<sub>2</sub> для широтного градиента с 90° с.ш. до 90° ю.ш. в период с 2000 по 2010 гг., разработанная американской лабораторией исследования Земли (Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA), где в качестве исходных данных использовались измерения концентрации CO<sub>2</sub> на морских и океанических станциях. Представленная модель хорошо отражает тот факт, что сезонность

концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  и, главным образом, ее амплитуда является наибольшей в северных широтах Северного полушария, затем она существенно снижается (к  $30^\circ$  с.ш.) и совсем исчезает по направлению к экватору. Эта закономерность, в первую очередь, обусловлена расположением главного наземного стока диоксида углерода, имеющего сезонность, – бореальных и умеренных лесов, произрастающих во внетропических широтах Евразии и Северной Америки.

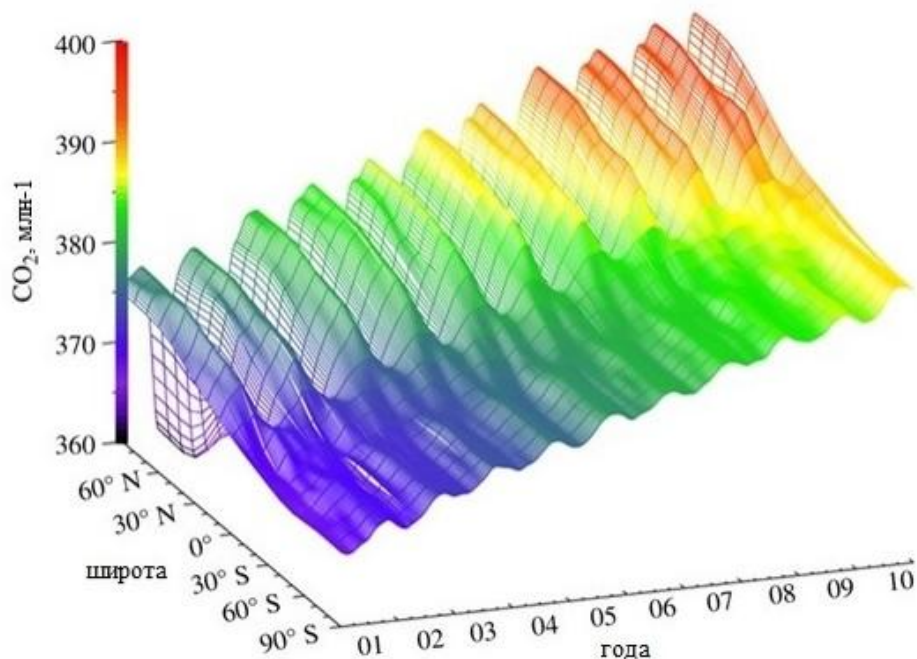


Рисунок 5.1 – Трехмерная модель глобального распределения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  ([www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov)).

В данном разделе будут рассмотрены количественные характеристики и особенности годового хода концентрации  $\text{CO}_2$  над экосистемами центральной части бореальной зоны Евроазиатского континента. Также будет представлено сопоставление распределения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири с Северной Атлантикой (Шетландские острова, станция “Shetlands”), последняя дает представление о фоновом распределении концентрации  $\text{CO}_2$  для всей географической широты, где расположена обсерватория “ZOTTO” ( $60^\circ$  с.ш.), и с Северной Америкой, где также произрастают аналогичные лесные биогеоценозы бореального пояса.

### 5.1. Количественная характеристика годовой динамики концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>

Особенности суточного хода концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>, показанные в главе 4, свидетельствуют о том, что физические процессы ПСА оказывают существенное влияние на ее распределение в разные периоды суток. В течение теплого времени года (апрель – октябрь) практически каждую ночь формируется устойчивый ПСА, где происходит накопление концентрации CO<sub>2</sub> за счет его выделения при дыхании различных компонентов наземных экосистем, а днем, наоборот, наблюдается конвективное перемешивание воздуха во всей толще ПСА, поэтому содержание диоксида углерода снижается (также дополнительно оно существенно уменьшается за счет фотосинтеза). Вследствие этого, в течение дневных часов, в условиях равномерного интенсивного перемешивания атмосферы, концентрация CO<sub>2</sub> стабильна, а ее вертикальный градиент близок к 0 (Тимохина и др., 2015).

Указанные физические особенности ПСА позволяют предполагать, что концентрация CO<sub>2</sub>, регистрируемая в дневное время на высотной мачте, репрезентативна для значительной территории: от 10<sup>3</sup> (Chen et al., 2013) до 10<sup>6</sup> км<sup>2</sup> (Gloor et al., 2000) на основе литературных данных, и 2.4 – 4.2×10<sup>6</sup> км<sup>2</sup> для 75% футпринта 301 м мачты обсерватории “ZOTTO” (детальное описание определения футпринта обсерватории “ZOTTO” представлено в главе 3). Кроме того, дневные измерения концентрации CO<sub>2</sub>, в отличие от ночных, меньше всего подвержены влиянию локальных источников CO<sub>2</sub> (Chen et al., 2013). В связи с этим для выявления годового хода концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в региональном масштабе принято использовать только дневные ее измерения (Watai et al., 2010; Аршинов и др., 2012; Sasakawa et al., 2013). Ключевая особенность используемых дневных концентраций CO<sub>2</sub> – это их вертикальная однородность и стабильность на протяжении нескольких дневных часов (Watai et al., 2010).

В результате анализа имеющейся к настоящему моменту литературы не выявлено четко установленного универсального временного интервала в течение дня, когда регистрируемая концентрация  $\text{CO}_2$  удовлетворяет показанным выше условиям и может быть использована для определения годового хода концентрации  $\text{CO}_2$ . Так, например, P.S. Bakwin и др. (1995) и K. Higuchi и др. (2003) приводят оценки, соответственно, в США (Северная Каролина) и Канаде (Онтарио) на основе интервала времени между 15:00 и 17:00 ч., H.Y. Inoue и H. Matsueda (2001) в Японии – между 13:00 и 16:00 ч., M.E. Pora и др. (2010) в Польше – между 13:00 и 18:00 ч., L. Naszpra (1999) в Западной Венгрии – между 12:00 и 16:00 ч. В то же время R.L. Thompson и др. (2009) и A.T. Vermeulan и др. (2011), анализируя распределение концентрации  $\text{CO}_2$  в течение года, применяют альтернативный подход, когда в расчетах используются все измерения концентрации  $\text{CO}_2$  полученные за сутки, но при исключении из них 25% наиболее высоких и низких измерений. При данном типе фильтрации устраняются также завышенные концентрации  $\text{CO}_2$ , регистрируемые, главным образом, ночью.

Для территории Западной Сибири (Томская область, пос. Березоречка) M. Sasakawa и др. (2013) используют дневные концентрации  $\text{CO}_2$ , измеренные между 13:00 и 17:00 ч. Внутри этого периода времени также исключались те часовые измерения концентрации  $\text{CO}_2$  разница между которыми превышала 10 млн<sup>-1</sup>. T. Watai и др. (2010) для этой станции использовал иной временной интервал – между 15:00 и 17:00 ч. Для района обсерватории “ZOTTO” приводятся немного иные временные интервалы. Так, E. Kozlova и др. (2008) использовали только концентрации  $\text{CO}_2$ , измеренные между 11:00 и 17:00 ч., исключая дополнительно в этом периоде 25% наиболее высоких и низких значений. J. Winderlich (2012) сократили этот период до 3-х часов (14:00 – 17:00 ч.) без какой-либо дополнительной фильтрации.

В рамках нашей работы определение дневного периода, когда концентрации  $\text{CO}_2$  однородна и стабильна по вертикальному профилю в течение нескольких дневных часов было выполнено по приведенной ниже

процедуре. Первоначальный этап заключался в расчете разницы в концентрации  $\text{CO}_2$  между нижней (4 м) и верхней (301 м) высотами ( $\Delta\text{CO}_2$ ) для каждого часа всего периода измерений (май 2009 – январь 2016). Затем рассчитывалась среднесуточная динамика  $\Delta\text{CO}_2$  для каждого месяца, усредненная за весь период наблюдений (рисунок 5.2).

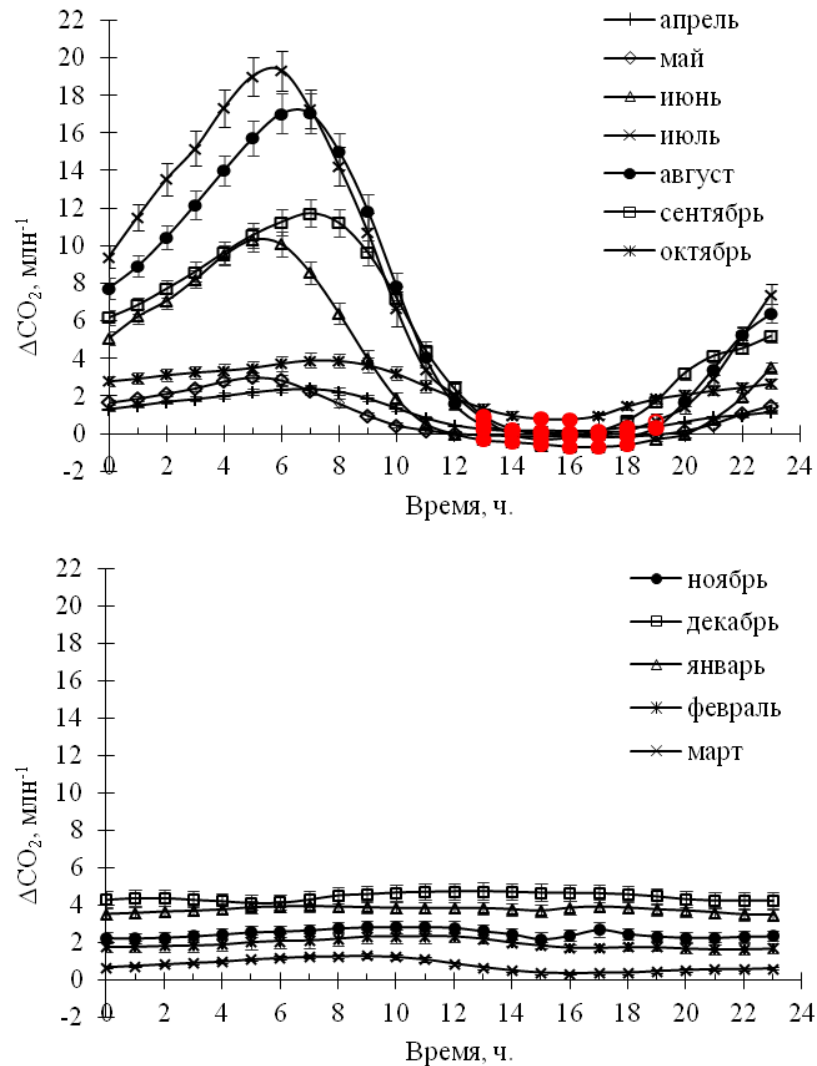


Рисунок 5.2 – Суточная динамика азницы между концентрацией  $\text{CO}_2$  на 4 и 301 м ( $\Delta\text{CO}_2$ ) в каждом месяце года, усредненная за весь период наблюдений (2009-2016 гг.).

После этого определялся интервал времени в течение светлого времени суток, когда между полученными среднечасовыми смежными значениями  $\Delta\text{CO}_2$



не наблюдалось достоверных различий при  $p < 0.05$  (этот период помечен красным цветом на рисунке 5.2).

Выявлено, что в теплое время года (с апреля по октябрь) в районе обсерватории “ZOTTO” продолжительность исследуемого дневного периода широко варьировала. В холодное время (ноябрь – март) достоверных различий (при  $p < 0.05$ ) между средними значениями  $\Delta\text{CO}_2$  не отмечалось на протяжении всего времени суток. Этот факт свидетельствует о том, что зимой различий в концентрации  $\text{CO}_2$  по вертикальному профилю в течение суток не наблюдается (за исключением случаев температурных инверсий, рассмотренных нами ранее в главе 4 (см. рисунок 4.4)).

Дневной период стабилизации и вертикальной однородности концентрации  $\text{CO}_2$  начинает формироваться весной, когда существенно возрастает продолжительность светового дня (рисунок 5.3). Так, в апреле период устойчивого перемешивания в ПСА составляет четыре часа (промежуток времени с 13:00 до 17:00 ч. местного времени (UTC +7)), в июне он увеличивается до пяти часов (13:00 – 18:00 ч.), а в июле – августе достигает своего максимума, составляя шесть часов (13:00 – 19:00 ч.). Начиная с сентября, прослеживается его сокращение до четырех часов (13:00 – 17:00 ч), в октябре этот период, как правило, уже не превышает двух часов (15:00 – 17:00 ч.).

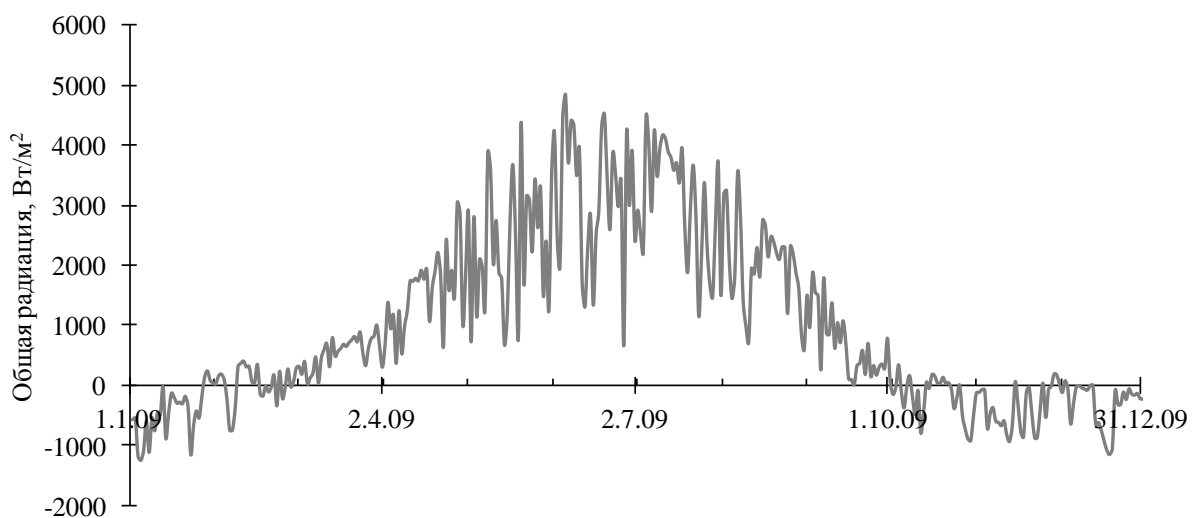


Рисунок 5.3 – Годовое распределение солнечной радиации в 2009 года по данным полученным на обсерватории “ZOTTO”.

Несмотря на различие в продолжительности периода стабилизации по месяцам, для определения годовой динамики концентрации  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” нами был выбран промежуток времени, одинаковый для всех месяцев – с 13:00 до 17:00 ч. местного времени, что было предпринято с целью облегчения проведения автоматических расчетов. В этот период концентрация атмосферного  $\text{CO}_2$  вертикально однородна и стабильна на протяжении практически всего года, за исключением октября. В зимнее время нами также, как и в теплый период года, использовались значения концентрации  $\text{CO}_2$  только за выбранный пятичасовой интервал. Как было показано в главе 4, периодически в зимнее время под действием барических образований наблюдается расслоение пограничной атмосферы, что приводит к формированию значительного вертикального градиента концентрации  $\text{CO}_2$ . В связи с этой особенностью поведения концентрации  $\text{CO}_2$  в холодное время года, для определения годовой динамики нами были взяты только измерения, полученные на высоте 301 м. Эта измерительная высота находится выше зимнего инверсионного слоя приземной атмосферы, что исключает завышение дневных средних значений концентрации  $\text{CO}_2$ .

Сглаженный временной ход концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , полученный по дневным измерениям за весь период наблюдений, показал, что в районе обсерватории “ZOTTO” она имеет хорошо выраженную годовую периодичность с ежегодными максимумами и минимумами в зимний и летний периоды, соответственно (рисунок 5.4).

Детальное обсуждение выявленных особенностей годового изменения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири нами проведено с привлечением результатов исследований атмосферно-экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена в 200-летнем сосняке лишайниковом, произраставшем в 5 км от обсерватории “ZOTTO”. На рисунке 5.5 представлены годовые распределения экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена (NEE), дыхания (ER) и чистой первичной продуктивности (NPP) этого сосняка, полученных на основе метода микровихревых пульсаций в 1999 – 2000 гг.

(Shibistova et al., 2002; Lloyd et al., 2002). Для наглядного сопоставления результатов нами использовались также дневные средние концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , измеренные в 1999 г. в этом же сосняке (газоанализатор модель 6262-3 Li Cor Inc., USA) и в 2009 – 2010 гг. на мачте обсерватории “ZOTTO”. Кроме того, дополнительно мы задействовали результаты лабораторного анализа изотопного отношения  $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$  и  $\text{O}^{16}/\text{O}^{18}$  в атмосферном  $\text{CO}_2$  ( $\delta\text{C}^{13}\text{-CO}_2$  и  $\delta\text{O}^{18}\text{-CO}_2$ , соответственно), полученные в образцах воздуха (рисунок 5.6). Последние отбирались в стеклянные емкости в период с апреля 2008 по декабрь 2012 гг. с высоты 301 м мачты обсерватории “ZOTTO” и анализировались методом масс-спектрометрии в лаборатории института Биогеохимии общества Макса Планка (Германия).

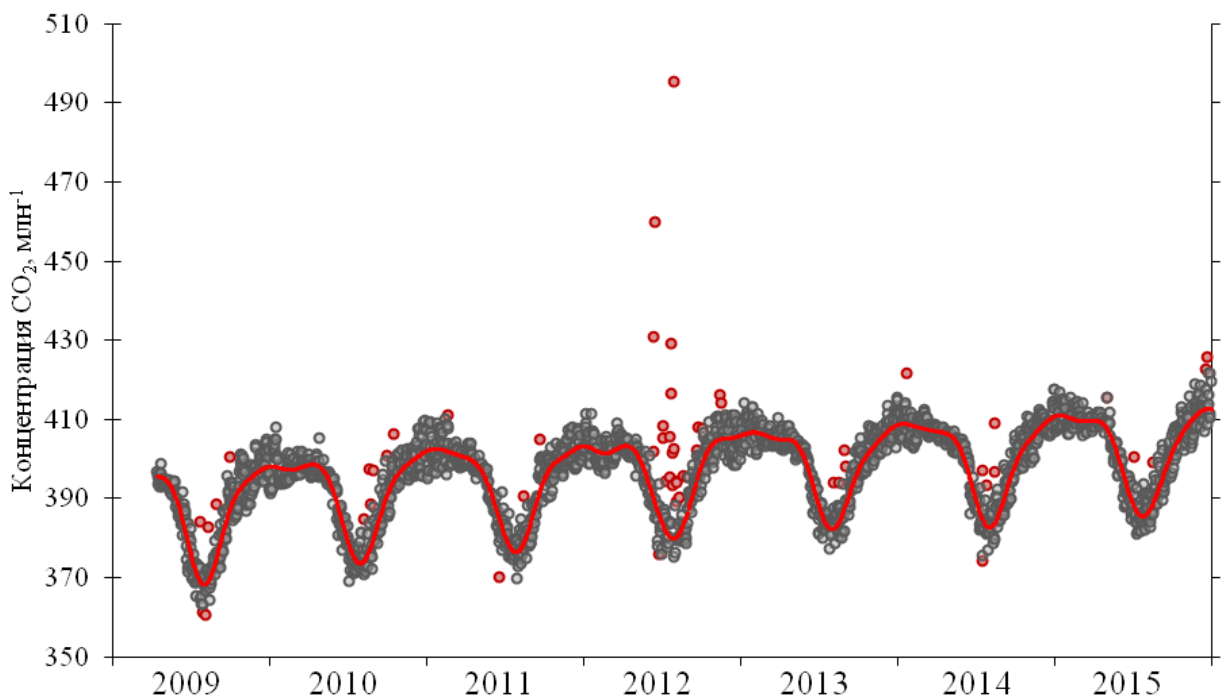


Рисунок 5.4 – Динамика дневных концентраций атмосферного  $\text{CO}_2$ , измеренных на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” (высота 301 м). Красная кривая показывает сглаженный временной ход концентрации  $\text{CO}_2$ , серые точки – дневные средние, красные точки – значения, лежащие за пределами  $\pm 3\sigma$  относительно сглаженного временного хода.

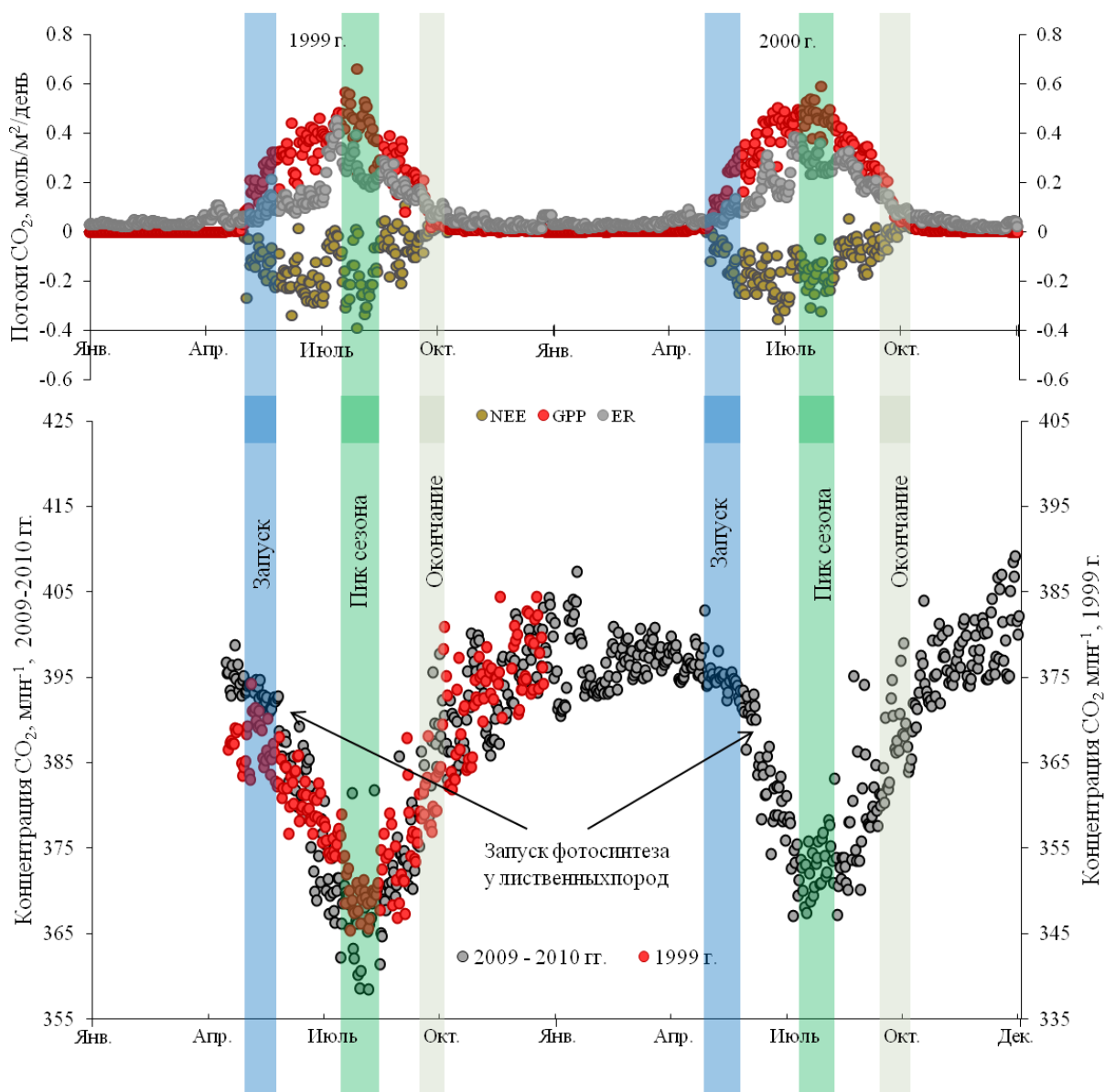


Рисунок 5.5 – Годовой ход экосистемного CO<sub>2</sub>-газообмена (NEE, синие точки), дыхания (ER, серые точки) и чистая первичная продуктивность (NPP, красные точки), полученная в 200-летнем сосняке лишайниковом в 1999 – 2000 гг.; Динамика концентрации CO<sub>2</sub>, измеренной в сосняке лишайниковом в 1999 г. (красные точки) и на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” (высота 301 м) в 2009 – 2010 гг. (серые точки).

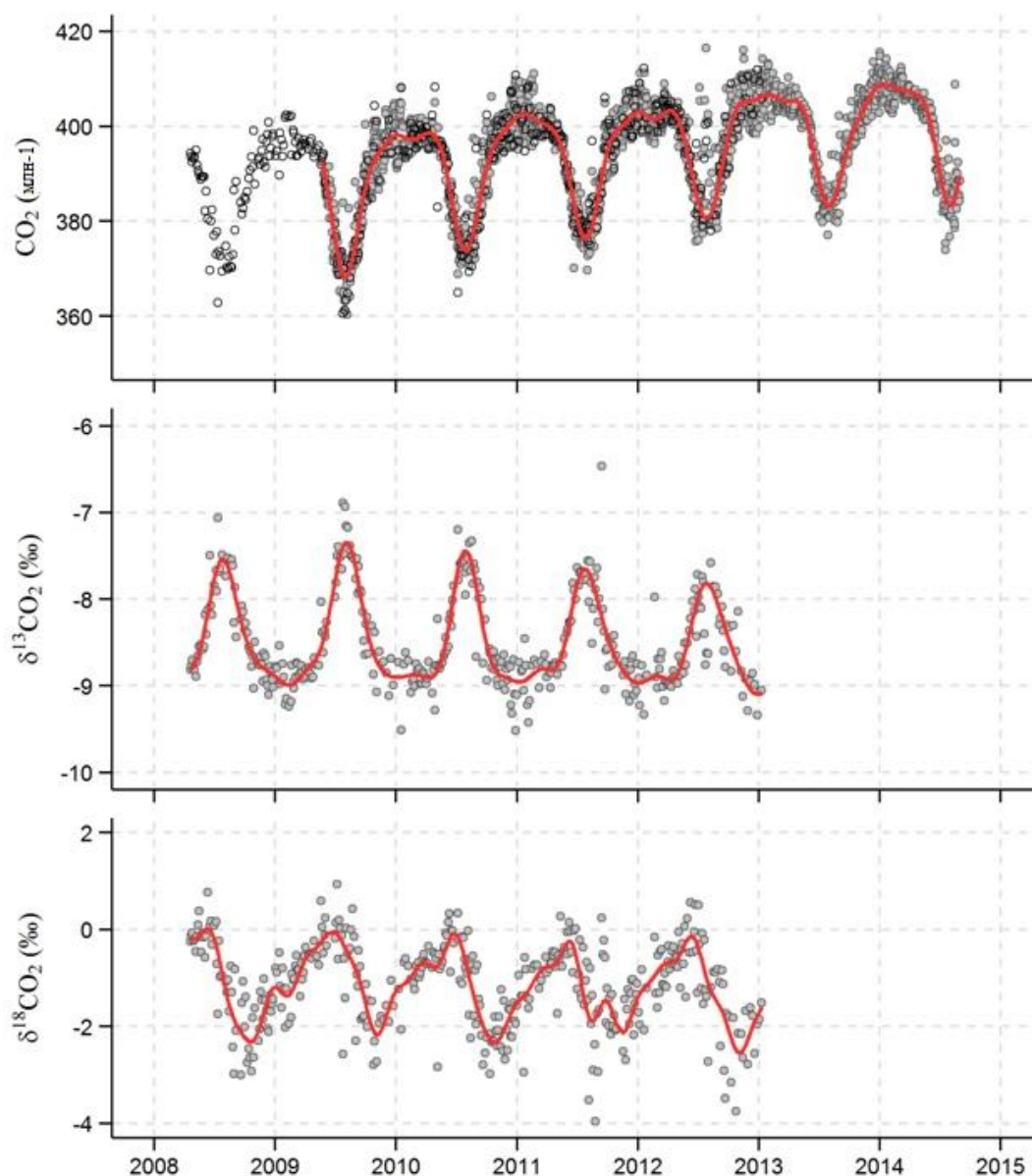


Рисунок 5.6 – Временная динамика концентрации CO<sub>2</sub> и содержания ее стабильных изотопов δC<sup>13</sup>-CO<sub>2</sub> и δO<sup>18</sup>-CO<sub>2</sub>, измеренных на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” Серые точки показывают измерения газоанализатором EnviroSense 3000i, черные полые точки – измерения в стеклянных емкостях.

Интенсивное снижение содержания диоксида углерода в атмосфере фиксируется, как правило, с мая, что обусловлено началом физиологической активности наземных экосистем среднетаежной подзоны Сибири при переходе температуры воздуха через нулевое значение и выше (Shibistova et al., 2002; Arneth et al., 2006). Так, средняя скорость убывания концентрации CO<sub>2</sub> в мае, рассчитанная по сглаженным значениям за семь лет наблюдений (май 2009 –

январь 2016), в которых исключена долговременная тенденция увеличения (красная кривая на рисунке 5.7), составляла  $0.21 \pm 0.03$  млн<sup>-1</sup> в день, при этом в течение всего месяца она нарастала от  $0.01 \pm 0.03$  (1 мая) до  $0.35 \pm 0.02$  (31 мая) млн<sup>-1</sup> в день.

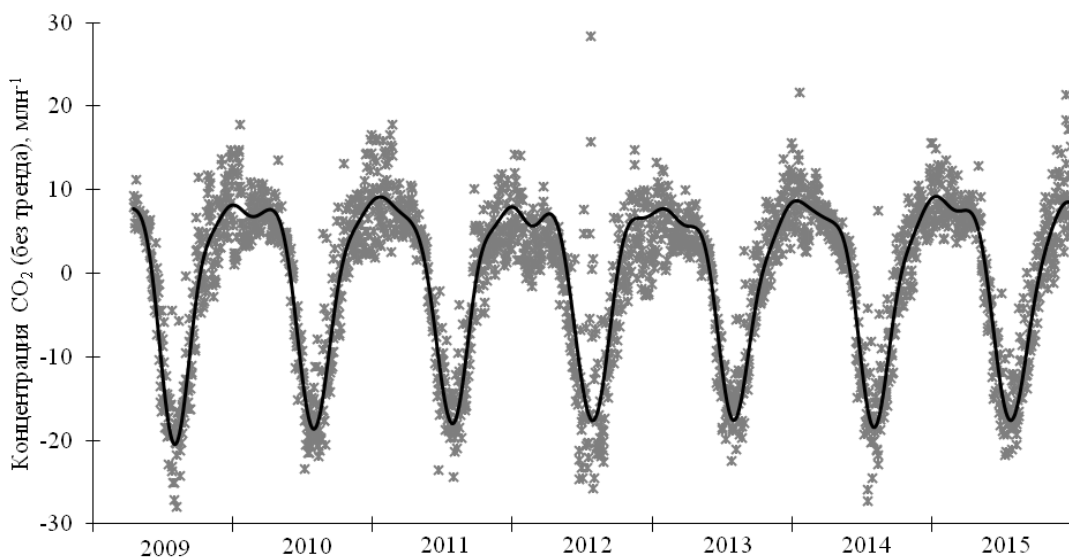


Рисунок 5.7 – Годовая цикличность концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>. На графике приведены дневные значения содержания CO<sub>2</sub> в которых удален временной тренд (серые крестики) и сглаженный ход (черная кривая). Удаление тренда в концентрации CO<sub>2</sub> и их сглаженный ход получены по методу k.W. Thoning и др. (1989) (описание метода приведено в главе 2).

На рисунках 5.5 и 5.6 видно, что снижение концентрации CO<sub>2</sub> начинается примерно в одно временно как с активизацией ассимиляции CO<sub>2</sub> из атмосферы (чистая первичная продуктивность нарастает, рисунок 5.5), так и началом изъятия из атмосферного воздуха молекул CO<sub>2</sub> с «облегченным» изотопом <sup>12</sup>C (соотношение изотопов C<sup>12</sup>/C<sup>13</sup> в атмосферном CO<sub>2</sub> возрастает, рисунок 5.6). Стоит пояснить, что в листьях C<sub>3</sub>-растений в процессе фотосинтеза происходит изотопное фракционирование CO<sub>2</sub>, а именно используется преимущественно «легкий» C<sup>12</sup> изотоп, а «тяжелый» C<sup>13</sup> остается в атмосфере, что приводит к формированию сезонной динамики содержания атмосферного δC<sup>13</sup>-CO<sub>2</sub> (Farquhar et al., 1993). Так, например, по данным J. Lloyd и др. (2002) с 1 по 8 мая 1999 г. поглощение CO<sub>2</sub> в сосняке лишайниковом возросло с 0.2 до 6

мкмоль/м<sup>2</sup>/сек, что обусловлено физиологическими процессами перестройки фотосинтезирующей системы в ассимилирующих органах хвойных пород поздней весной при повышении температуры воздуха и, следовательно, запуском фотосинтеза, и его мгновенным нарастанием в течение нескольких дней. При этом активизация дыхания гетеротрофного звена экосистемы происходит значительно медленнее, чем автотрофного, о чем свидетельствуют данные экосистемного дыхания (рисунок 5.5). Эта закономерность также согласуется с поведением  $\delta\text{O}^{18}\text{-CO}_2$ , когда происходит утяжеление изотопного состава атмосферного  $\text{CO}_2$  вызванного высокими значениями валовой продукции растительного покрова в конце мая – начале июня (рисунок 5.6) (Flanagan et al., 1997; Wingate et al., 2010).

Наибольшая скорость снижения концентрации  $\text{CO}_2$  отмечается в июне, на протяжении всего месяца она находится примерно на одном уровне –  $0.41 \pm 0.03$  млн<sup>-1</sup> в день (средняя за семь лет). Необходимо заметить, что лиственные породы (береза пушистая (*Betula pubescens*), осина обыкновенная (*Populus tremula*) и другие) среднетаежной подзоны Сибири, в отличие от хвойных, начинают интенсивно поглощать  $\text{CO}_2$  значительно позже, когда у них сформируется новая листва. По данным С. Roser et al. (2002) березняк в районе обсерватории “ZOTTO” трансформируется из источника  $\text{CO}_2$  в его сток с первой декады июня, при этом переход осуществляется мгновенно: в течение двух дней величина чистого экосистемного  $\text{CO}_2$ -газообмена снижается с +1.0 до – 2.5 гС/м<sup>2</sup>/день. Вероятно, поэтому, в годовом распределении концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” можно отчетливо проследить время начала функционирования именно лиственных древостоев в качестве стока углерода. Так, в конце мая – начале июня (в зависимости от погодных условий) практически ежегодно наблюдается период, включающий два – три дня, когда содержание диоксида углерода в воздухе резко сокращается, как например в 2010 г., когда оно за сутки уменьшилось на 6.5 млн<sup>-1</sup>.

Снижение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  продолжается до конца июля. За шестилетний период исследований (из расчетов исключен июль 2012 г. из-за задымленности в результате крупномасштабных пожаров в окрестностях обсерватории) абсолютный годовой минимум концентрации  $\text{CO}_2$  регистрировался в один из дней с 26 июля по 3 августа, минимальные концентрации сохранялись в течение 10-14 дней. Средняя скорость снижения содержания  $\text{CO}_2$  над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири в июле составляла  $0.21 \pm 0.02$  млн<sup>-1</sup> в день, при этом в течение всего месяца она замедлялась, так 1 июля она была  $0.37 \pm 0.03$ , а уже 31 июля –  $0.02 \pm 0.001$  млн<sup>-1</sup>. Такое поведение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  связано с особенностями  $\text{CO}_2$ -газообмена в лесных биогеоценозах района исследования. На протяжении июля происходит постепенное нарастание эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  за счет усиления экосистемного дыхания, тогда как фотосинтетическая ассимиляция углерода растительностью достигает своего максимума уже к концу июня - первой половине июля, после чего начинается ее ослабление, хотя в зависимости от метеорологических условий она может поддерживаться на высоком уровне в течение всего июля (пик поступающей фотосинтетически активной радиации приходится на конец июня - начало июля). Поэтому максимум чистого  $\text{CO}_2$ -газообмен, а именно стока атмосферного  $\text{CO}_2$ , регистрируется также обычно с конца июня. Ежегодный пик в снижении концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  по измерениям на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”, как было показано выше, наблюдается в конце июля – начале августа, следовательно, на несколько недель позже, чем начинает регистрироваться максимальная активность поглотительной способности  $\text{CO}_2$  в лесных биогеоценозах.

Исследователи атмосферного транспорта  $\text{CO}_2$  предполагают, что показанная особенность обусловлена тем, что на годовое распределение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , кроме физиологических процессов растительности, значительное влияние также оказывает сезонная динамика конвективного перемешивания воздуха внутри ПСА. J. Lloyd и др. (2002)



показали, что для территории района исследования высота конвективного ПСА интенсивно нарастает с мая по конец июля, а с начала августа она имеет тенденцию к резкому снижению, которое продолжается до ноября. Иными словами, на протяжении всего вегетационного сезона атмосферная  $\text{CO}_2$  распределяется в разном объеме воздуха ПСА, а наибольший он в конце июля – начале августа (до 3000 м), что в результате приводит к снижению ее концентрации в воздухе и формированию минимума именно в этот период с последующим нарастанием (Denning et al., 1996). Однако, как видно на рисунке 5.6, сезонный ход  $\delta\text{C}^{13}\text{-CO}_2$  обнаруживает обратную зависимость от концентрации  $\text{CO}_2$ , при этом время наступления пиков совпадает. Данный факт отражает поглощение  $\text{CO}_2$  из атмосферы с «легкими» изотопами (фракционирование  $\text{CO}_2$  в процессах фотосинтеза) в начале сезона и продолжающееся «утяжеления» атмосферного  $\text{CO}_2$  до начала августа. Следовательно, наименьшее содержания атмосферного  $\text{CO}_2$  в конце июля – начале августа обусловлено именно его максимальной фотоассимиляцией из атмосферы, поскольку изотопное отношение  $\text{C}^{12}/\text{C}^{13}$  в  $\text{CO}_2$  не зависит от объема воздуха в котором растворены молекулы углерода.

В августе наблюдается устойчивое нарастание содержания атмосферного  $\text{CO}_2$  со средней скоростью  $0.18 \pm 0.03$  млн<sup>-1</sup> в день, при этом отмечается ее ускорение: в начале месяца она составляла минус 0.0017 (отсутствие роста), а в конце  $-0.34 \pm 0.04$  млн<sup>-1</sup>. Примерно такой же уровень роста концентрации  $\text{CO}_2$  ( $0.36 \pm 0.03$  млн<sup>-1</sup> в день) сохраняется в течение всего сентября.

Показанные изменения в содержании  $\text{CO}_2$  в конце вегетационного периода является следствием превалирования эмиссии  $\text{CO}_2$  за счет гетеротрофного и частично автотрофного дыхания над его поглощением растительностью (рисунок 5.5). В конце сентября – начале октября, после первых затяжных заморозков, поглощение диоксида углерода в процессе фотосинтеза в лесных экосистемах полностью прекращается, однако выделение  $\text{CO}_2$  из почвы продолжается на протяжении всего октября. Показанная закономерность также хорошо согласуется с динамикой содержания

стабильного изотопа  $\delta\text{O}^{18}\text{-CO}_2$  в приземной атмосфере. Так, с начала июля до середины октября ежегодно происходит «облегчение» изотопного состава атмосферного  $\text{CO}_2$ . Оно вызвано как постепенным усилением потребления гетеротрофными микроорганизмами «облегченной» воды из почвы, которое происходит за счет возрастания температуры почвы на протяжении вегетационного сезона, так и дискриминацией тяжелого изотопа кислорода в процессах автотрофного дыхания (Flanagan et al., 1997; Wingate et al., 2010).

Распределение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , полученное нами, хорошо согласуются с аналогичными оценками, представленными ранее для Сибири (Kozlova et al., 2008; Winderlich, 2012; Аршинов и др., 2012) и других районов Северного Полушария (Thompson et al., 2009; Popa et al., 2010).

Для всего периода наблюдений нами регистрировалось устойчивое возрастание абсолютных значений минимальных летних концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере, характерных для конца июля – начала августа. Так, с начала наших измерений минимальные концентрации возросли в среднем на  $17 \text{ млн}^{-1}$ : с  $367.3 \pm 1.5 \text{ млн}^{-1}$  (2009 г.) до  $384.2 \pm 2.4 \text{ млн}^{-1}$  (2015 г.). Несмотря на то, что влияние растительности на концентрацию  $\text{CO}_2$  практически прекращается в октябре, пиковых значений концентрация  $\text{CO}_2$  достигает в декабре-январе, а в отдельные годы в марте (2012 г.). Подобно летним концентрациям мы наблюдаем ежегодный рост  $\text{CO}_2$  и в зимний период: от  $397.2 \pm 2.7 \text{ млн}^{-1}$  (2010 г.) до  $410.1 \pm 2.7 \text{ млн}^{-1}$  (2016 г.). Сравнительный анализ прироста концентраций  $\text{CO}_2$  в летний ( $17 \text{ млн}^{-1}/7 \text{ лет}$ ) и зимний ( $13 \text{ млн}^{-1}/7 \text{ лет}$ ) периоды свидетельствует о более выраженном их приросте в течение вегетационного сезона. Причины, способствующие большему нарастанию концентраций  $\text{CO}_2$  в теплое время года по сравнению с холодным, будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

Вместе с тем для исследуемого периода отмечена существенная межгодовая вариация летних концентраций  $\text{CO}_2$ . Она отчетливо проявилась при рассмотрении дневных измерений (рисунок 5.7), в которых удален временной тренд нарастания концентрации  $\text{CO}_2$ . Он формирует до 90% регистрируемого сигнала содержания диоксида углерода (Nakazawa et al., 1997; Pickers and

Manning, 2015). Распределение концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  без временного тренда роста отражает вклад в ее формирование как локальных экосистем подстилающей поверхности, так и географические особенности местоположения станции.

Так, сезон 2009 г характеризуется наименьшим уровнем содержания диоксида углерода (на  $\sim 2 \text{ млн}^{-1}$  ниже среднего, рассчитанного за 7 лет) в июле – августе по сравнению с последующими годами. Данный факт объясняется в первую очередь более высокой поглотительной способностью наземных экосистем в теплом ( $+2^\circ \text{ C}$  относительно среднемноголетнего среднего) и влажном ( $+60 \text{ мм}$ ) вегетационном сезоне 2009 г. (таблица 5.1). В 2010 г., в период пика фотосинтетической активности растительности, отмечалось раннее начало сезонного возрастания  $\text{CO}_2$  – минимум концентрации был зафиксирован уже в первой половине июля. Необходимо отметить, что в это лето Европейская часть России с 18 июня по 18 августа находилась в зоне действия блокирующего антициклона, что привело к сухой жаркой погоде и, как следствие, к лесным и торфяным пожарам. Площадь, пройденная огнем, составила 1.2 млн. га (Еланский и др., 2011). Пожары являются одним из главных источников поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу. По данным А.З. Швиденко и др. (2011) эмиссия углерода в 2010 году составила 0.15 Гт С, при этом среди углеродсодержащих продуктов горения на долю диоксида углерода приходится от 71 до 85% (Швиденко и др., 2011; Liu et al., 2014). В результате атмосферной циркуляции, преимущественно западного переноса, продукты горения быстро распределяются по широте. Поэтому причиной повышенной концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  во второй половине вегетационного периода 2010 года стало, по-видимому, комплексное воздействие нескольких факторов: холодное (на  $3.0^\circ \text{ C}$  ниже среднемноголетнего) дождливое (на 80 мм выше нормы) лето в Сибири и крупномасштабные лесные пожары в Европейской части России.

Таблица 5.1 – Погодичная вариация среднемесячных значений температуры воздуха ( $T$ ), количества осадков ( $P$ ) и ФАР

Год	Май			Июнь			Июль			Август		
	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$\Phi AP,$ моль/ $\text{м}^2/$ мес.	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$\Phi AP,$ моль/ $\text{м}^2/$ мес.	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$\Phi AP,$ моль/ $\text{м}^2/$ мес.	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$\Phi AP,$ моль/ $\text{м}^2/$ мес.
2009	2.5	34.1	28.7	13.8	121.7	35.9	20.1	132.0	38.2	16.4	43.8	29.5
2010	4.8	45.8	31.5	11.8	94.9	32.3	14.9	89.0	34.0	12.4	96.6	22.8
2011	9.6	23.0	33.0	20.0	27.9	38.1	14.3	104.7	28.5	13.3	63.1	23.0
2012	7.5	50.8	29.2	20.3	13.2	40.5	21.2	6.8	27.5	13.6	36.3	24.5
2013	4.1	91.4	24.1	15.3	84.4	35.9	20.6	17.9	40.6	16.7	47.3	23.2
2014	5.2	42.2	29.3	15.9	76.6	36.5	19.7	74.1	34.7	13.2	71.2	24.7
2015	10.4	47.5	30.1	18.5	64.1	37.4	19.4	112.7	37.0	14.3	120.1	22.8
Среднее многолетнее (по данным метеостанции Бор)*	5.2	44.5		13.7	56.4		17.8	67.3		13.9	74.8	

\*Метеорологические данные с метеостанции Бор получены из базы данных NOAA (NOAA. National Center for Environmental Information)

Жаркая погода с небольшим количеством осадков в мае – июне 2011 года (средняя температура воздуха была выше среднемноголетней на 4.4 и 6.3° С в мае и в июне, соответственно) привела к раннему запуску фотосинтетической активности растительности и в результате к низким значениям концентрации CO<sub>2</sub> для этого периода года. Последующая резкая смена этой погоды на холодную дождливую в июле вызвала, вероятно, превалирование процессов выделения CO<sub>2</sub> (дыхание) над его поглощением (фотосинтез), что привело к повышению содержания диоксида углерода в приземной атмосфере и, как следствие, минимальные концентрации CO<sub>2</sub> фиксировались позже – в августе.

Вегетационный период 2012 года (май-июль) характеризовался повышенными температурами воздуха (средняя температура июня и июля были выше среднемноголетней на 6.6° и 3.4° С, соответственно) и нарастающим дефицитом осадков (таблица 5.1). В результате в районе обсерватории “ZOTTO” сформировались условия для возникновения крупномасштабных лесных пожаров, которые подходили на расстояние <15 км (Winderlich et al., 2014). Как следствие значительных эмиссий CO<sub>2</sub> при горении фито- и мортмассы в экосистемах, регистрировались периодические всплески концентрации CO<sub>2</sub>, которые превышали 500 млн<sup>-1</sup> (рисунок 5.4). О.А. Антамошкиной и М.А. Корецом (2015) показано, что с 2000 по 2014 гг. вокруг обсерватории “ZOTTO” (в работе рассматривается радиус 100 км) огнем пройдено более 25% территории, при этом на 2012 г. приходится 83% от общей площади, подвергшейся пирогенному влиянию за 15 лет. Наибольшие площади повреждений наблюдаются в темнохвойных (3500 км<sup>2</sup>) и сосновых (2100 км<sup>2</sup>) лесах. Также необходимо отметить, что весна 2012 года характеризовалась аномально высокими концентрациями CO<sub>2</sub>, когда отмечались повышенные среднемесячные концентрации CO<sub>2</sub> в марте (408.5 млн<sup>-1</sup>) и апреле (406.6 млн<sup>-1</sup>). Абсолютные значения таких концентраций вновь повторились только через три года (в 2015 г.). Можно предположить, что высокие концентрации CO<sub>2</sub> весной 2012 года обусловлены как теплой

погодой в Арктике, где в этот год наблюдались самые большие зимние положительные аномалии температуры воздуха, так и холодной погодой в Европе, когда температура воздуха опускалась ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  (Семенов и др., 2013). По данным Е.А. Семенова и др. (2013) в январе на островах Карского моря аномалии среднемесячной температуры превысили  $+15^{\circ}\text{C}$ , а на острове Хейса (земля Франса-Иосиса) –  $+16^{\circ}\text{C}$ . Также впервые за весь период инструментальных наблюдений в этих районах в январе зарегистрирована температура воздуха выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Такая погода могла способствовать повышенному выделению  $\text{CO}_2$  как в арктическом секторе (протаивание мерзлотного слоя), так и в Европе (антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  в отопительный сезон).

## **5.2. Межгодовая изменчивость годового хода концентрации атмосферного $\text{CO}_2$**

Удаление временной тенденции роста (рисунок 5.7) позволяет получить основные характеристики годового распределения концентрации  $\text{CO}_2$ , такие как амплитуда (годовая и сезонная) и фаза, а также провести анализ их изменчивости по годам (Keeling et al., 1996, Murayama et al., 2007).

Сезонная амплитуда концентрации  $\text{CO}_2$  представляет собой относительный показатель чистой экосистемой продукции, а именно разницы между чистой первичной продукцией и экосистемным дыханием за период, когда фотосинтетическая ассимиляция  $\text{CO}_2$  доминирует над его выделением (Varichivich et al., 2012). Этот период длится с момента начала интенсивного снижения (апрель) до достижения ею минимальных годовых значений (конец июля – начала августа). При этом годовая амплитуда концентрации  $\text{CO}_2$  в отличие от сезонной, дополнительно включает зимнюю эмиссию  $\text{CO}_2$  (рисунок 5.8).

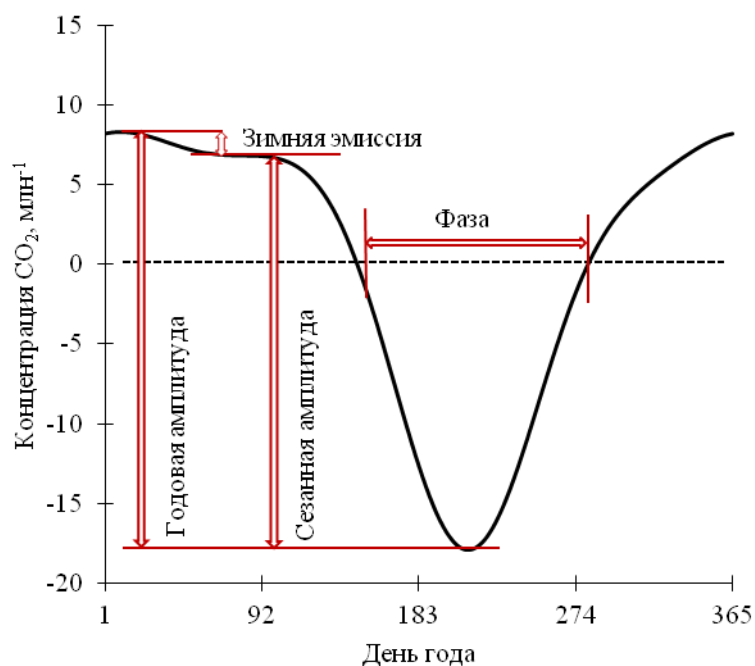


Рисунок 5.8 – Схема определения характеристик годового распределения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>.

Годовая амплитуда колебаний атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири за период с мая 2009 по январь 2016 гг. в среднем составляла  $26.4 \pm 0.8$  млн<sup>-1</sup> (таблица 5.2). Полученная нами оценка согласуется с ранее приведенными (22 – 28 млн<sup>-1</sup>) для района обсерватории “ZOTTO” (Lloyd et al., 2002; Kozlova et al., 2008; Winderlich, 2012). Близкие значения (24 – 30 млн<sup>-1</sup>) показаны в работе, обобщающей данные сети мониторинга ПГ “JR-STATION” (Аршинов и др., 2012) для Западной Сибири. Выраженной закономерности в изменение годовой амплитуды колебаний CO<sub>2</sub> за исследуемый семилетний период нами не выявлено. Так, ее наибольшее значение наблюдалось в 2011 г. (27.0 млн<sup>-1</sup>), а наименьшее – в 2013 г. (25.2 млн<sup>-1</sup>). Однако, знакомство с опубликованными данными показывает, что за последние 50 лет, преимущественно с 1975 года по настоящее время, в Северном полушарии регистрируется увеличение амплитуды годового хода концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> (Keeling et al., 1996; Randerson et al., 1997; Graven et al., 2013; Zhao and Zeng, 2014; Forkel et al., 2016; Ito et al., 2016; Wenzel et al., 2016).

Таблица 5.2 – Межгодовое изменение годовой амплитуды, а также минимальных, максимальных значений концентраций CO<sub>2</sub> (без временного тренда) над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири

Год	Минимум (лето), млн <sup>-1</sup>	Максимум (зима), млн <sup>-1</sup>	Зимняя эмиссия, млн <sup>-1</sup>	Годовая амплитуда, млн <sup>-1</sup>
2009	-20.4			
2010	-18.6	8.1	0.8	26.7
2011	-17.9	9.1	2.5	27.0
2012	-17.6	7.9	1.0	25.5
2013	-17.5	7.7	2.4	25.2
2014	-18.4	8.6	2.8	27.0
2015	-17.5	9.1	2.0	26.7
2016		8.5		
Среднее значение	-18.3±1	8.4±0.6	1.9±0.8	26.4±0.8

Так, Graven и др. (2013) на основе длительных инструментальных наблюдений за содержанием атмосферного диоксида углерода на станциях “Barrow” (Аляска (71°с.ш., 156° з.д.), 1961 – настоящее время) и “Mauna Loa (США (20°с.ш., 156° з.д.), 1958 – настоящее время), показали, что сезонная амплитуда CO<sub>2</sub> возросла за последние 50 лет на 30% и 16%, соответственно. Кроме того, эта группа ученых сравнила данные авиационных исследований, предпринятых в 1958-1961 гг. и 2009-2011 гг., и установила, что сезонная амплитуда атмосферного CO<sub>2</sub> в широтах севернее 45° с.ш. возросла на 50% (Graven et al., 2013). Авторы этого исследования предполагают, что рост амплитуды CO<sub>2</sub> обусловлен высокой чувствительностью распределения концентрации CO<sub>2</sub> к атмосферной циркуляции. Тем не менее, основные механизмы, ответственные за увеличение амплитуды концентрации CO<sub>2</sub> остаются дискуссионными (Forkel et al., 2016; Ito et al., 2016). Наиболее вероятной причиной показанного роста рассматривается гипотеза о том, что в наземных экосистемах Северного полушария под действием изменения



климата происходит трансформация цикла углерода, а именно увеличение интенсивности фотосинтетической ассимиляции  $\text{CO}_2$ , гетеротрофного дыхания в течение вегетационного сезона и смена растительного покрова, в частности, озеленение тундры за счет возрастания площади кустарниковой растительности, продвижение границы леса на север и возобновление гарей в бореальных лесах (Харук и др. 2006; Forkel et al., 2016). В работе S. Wenzel и др. (2016), где проведена верификация комплекса моделей по функционированию климатической системы Земли многолетними наблюдениями за концентрацией  $\text{CO}_2$  на станции “Barrow”, отмечается, что увеличение годовой амплитуды на  $1 \text{ млн}^{-1}$  сопровождается приростом продуктивности растительности на  $0.13\text{-}0.22 \text{ Гт С}$  в год. Исходя из этих исследований, мы предполагаем, что показанные тенденции в амплитуде годового хода концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , а именно ее рост, наблюдаемые в Северном полушарии, также характерны и для центральной части Сибири. Однако они отчетливо проявятся только при очень длительных наблюдениях за концентрацией атмосферного  $\text{CO}_2$  (более 50 лет), которые позволят исключить влияние на нее локальных эффектов.

Необходимо отметить, что абсолютные минимальные концентрации  $\text{CO}_2$ , в которых исключен временной тренд увеличения, в районе обсерватории “ZOTTO” варьируют от  $-17.5$  до  $-20.4 \text{ млн}^{-1}$ , составляя в среднем  $-18.3 \pm 1 \text{ млн}^{-1}$  (таблица 5.2). Тенденции к снижению летних концентраций  $\text{CO}_2$  за исследуемый семилетний период, которая может свидетельствовать об увеличении поглотительной способности лесных экосистем Приенисейской Сибири, также не выявлено.

Второй важной характеристикой годового хода концентрации  $\text{CO}_2$  является фаза сезонности. В мировом научном сообществе под фазой сезонности рассматривается период времени, когда концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в которых исключен временной тренд роста, находятся в области отрицательных значений. Фаза – это период года в течение которого растительность поглощает  $\text{CO}_2$  из атмосферы в процессе фотосинтеза

(Murayama et al., 2007; Varichivich et al., 2012) (рисунок 5.8). На различных станциях мониторинга атмосферы Северного полушария дата весеннего перехода детрендриванной концентрации  $\text{CO}_2$  через ноль, а именно из области положительных в отрицательные значения, используется как индикатор межгодовой вариабельности запуска фотоассимиляции  $\text{CO}_2$  в регионе исследования. Однако эта дата не является фактическим сроком начала фотосинтеза (Murayama et al., 2007). Так, С.Д. Keeling и др. (1996), впервые используя измерения концентрации  $\text{CO}_2$  на станциях Северного полушария (“Barrow”, “Alert” и “Mauna Loa”), показали, что дата весеннего перехода детрендриванной концентрации  $\text{CO}_2$  через ноль постепенно смещается на более ранние сроки, что может свидетельствовать о раннем запуске фотосинтетической активности в лесных биогеоценозах, и, следовательно, расширении весенней границы вегетационного сезона. Дата осеннего перехода детрендриванных концентраций  $\text{CO}_2$  через ноль является индикатором окончания биосферной деятельности наземных экосистем и, следовательно, косвенным показателем межгодовой вариабельности осенней границы вегетационного сезона.

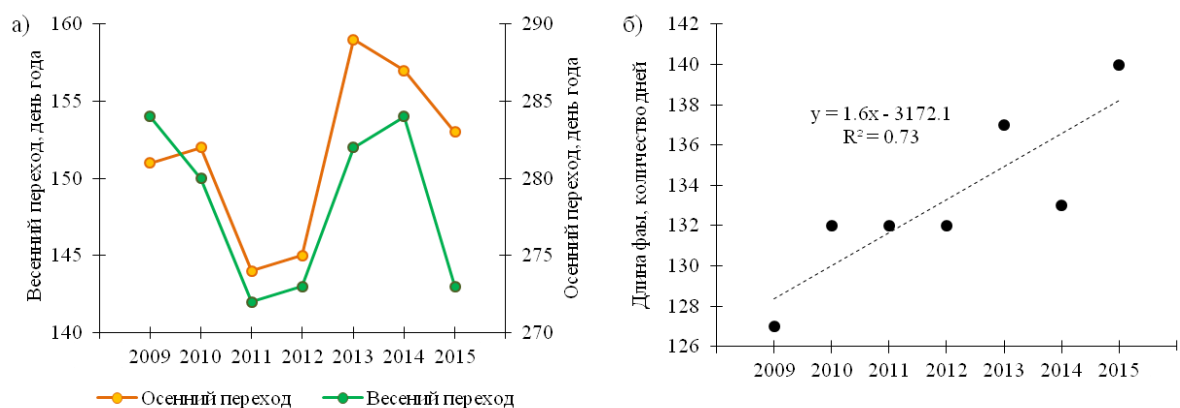


Рисунок 5.9 – Межгодовое изменение, а) наступления сроков весенних и осенних переходов детрендриванной концентрации  $\text{CO}_2$  через ноль; б) продолжительности фазы сезонности концентрации  $\text{CO}_2$ .

В результате наших расчетов установлено, что весенний и осенний переходы детрендрированной концентрации  $\text{CO}_2$  через ноль над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири происходят, соответственно, на  $148 \pm 5$  день года (28 мая) и  $282 \pm 5$  день года (9 октября), а фаза сезонности составляет  $133 \pm 4$  дня. При этом длина вегетационного сезона в районе обсерватории “ZOTTO” составляет 91 – 93 дня, когда температура воздуха выше  $10^\circ \text{C}$  и 168 – 173 дня, когда температура воздуха выше  $0^\circ \text{C}$  (Schulze et al., 2002). Статистически значимой тенденции в изменениях сроков наступления весеннего и осеннего переходов детрендрированной концентрации  $\text{CO}_2$  через ноль за исследуемый семилетний период не выявлено (рисунок 5.9 а)). Вместе с тем, нами отмечается увеличение продолжительности вегетационного сезона (фазы) в районе обсерватории “ZOTTO” со скоростью 1.6 день в год (рисунок 5.9 б)), что существенно выше, чем показано ранее для всей Евразии ( $4 \pm 1$  день за 10 лет) (Varichivich et al., 2012).

### **5.3. Особенности годовой динамика концентраций $\text{CO}_2$ над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири по сравнению с Северной Атлантикой и бореальным поясом Северной Америки**

Определенный интерес представляет сравнительный анализ географических особенностей распределения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в бореальном поясе. В этих целях, наряду с приведенными выше измерениями на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”, использовались результаты, полученные на четырех канадских станциях (таблица 5.3): “Fraserdale”, “East Trout Lake”, “Lac la Biche” и “Egbert”, предоставленные Мировым центром данных по парниковым газам (World Data Centre for Greenhouse Gases), и временной ряд содержания диоксида углерода со станции “Shetlands” (Шотландия), любезно предоставленный профессором Мартином Хайманном (институт биогеохимии общества Макса Планка).

Таблица 5.3 – Характеристика районов расположения станций

Название станции	Географические координаты и район расположения		Лесообразующие породы:	Средняя многолетняя годовая температура*, (С°)	Среднее годовое количество осадков*, (мм)	Продолжительность вегетационного сезона (t>5°С)*	NEE (гС/м <sup>2</sup> /год)	Антропогенная эмиссия CO <sub>2</sub> **(т/год)	Источник
“ZOTTO”	60.48° с.ш., 89.21° в.д., 114 м	Красноярский край	Темнохвойные леса: ель сибирская ( <i>Picea obovata</i> ), пихта сибирская ( <i>Abies sibirica</i> ); сосняки: сосна обыкновенная ( <i>Pinus sylvestris</i> )	-3.8	558	134±7	-100...-270 <sup>1</sup> -145...-163;	Нет данных	Roser et al., 2002; Lloyd et al., 2002
“Fraserdale”	49.88°с.ш., 81.57°з.д., 210 м	Северо-западная часть провинции Онтарио	Смешанный лес: сосна белая ( <i>Pinus strobus</i> ), ель черная ( <i>Picea mariana</i> ), пихта бальзамическая ( <i>Abies balsamea</i> ), береза пушистая ( <i>Betula pubescens</i> )	1.6	853	166±10	-9...-90	1 – 100	Higuchi et al., 2003; Chen and Chen, 2005
“EastTrout Lake”	54.21°с.ш., 104.59° з.д. 492 м	Центральная часть провинции Саскочеван	Смешанный лес: ель черная ( <i>Picea malana</i> ), лиственница американская ( <i>Larix laricina</i> ).	0.7	416	173±12	-8...-195 <sup>1</sup>	100 – 500	Sonnentag et al, 2010
“Lac La Biche”	54.95°з.ш., 112.45°з.д. 540 м	Центральная часть провинции Альберта	Смешанный лес: ель черная ( <i>Picea mariana</i> ) лиственница американская ( <i>Larix laricina</i> ) и береза железистая ( <i>Betula pumila</i> )	2.1	504	176±12	-144...-176	500 – 1000	Syed et al., 2006
“Egbert”	44.23°с.ш., 79.78°з.д. 253 м	Южная часть провинции Онтарио	Широколиственные леса: тополь крупнозубчатый ( <i>Populus grandidentata</i> ), клен красный ( <i>Acer rubrum</i> ), ясень американский ( <i>Fraxinus americana</i> ).	6.8	817	211±12	-100...-280	10000 – 30000	Lee at al., 1999

Примечание: Данные предоставлены: \* NOAA. National Center for Environmental Information; \*\* Environment and Climate Change Canada.

NEE – экосистемная нетто-продуктивность,

<sup>1</sup> – величина представлена для вегетационного сезона (гС/м<sup>2</sup>/сезон).

Над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири амплитуда годового колебания концентрации  $\text{CO}_2$  существенно выше по сравнению с бореальным поясом Северной Америки, поскольку обнаружены наибольшие различия со станциями “Fraserdale”, “Lac La Biche” и “East Trout Lake” (таблица 5.4). Амплитуда колебания в центральной части Сибири незначительно меньше таковой в урбанизированных и освоенных сельскохозяйственной деятельностью районах Канады – станции “Egbert”. Одной из причин увеличения годовой амплитуды концентрации  $\text{CO}_2$  на последней рассматриваемой станции может быть антропогенный фактор, обуславливающий очень высокие значения зимних концентраций  $\text{CO}_2$  за счет дополнительного сжигания углеводородов в период отопительного сезона в урбанизированных районах.

Таблица 5.4 – Характеристики среднего годового хода концентраций  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” и станций Северной Америке с 2009 по 2014 гг.

Название станции	Годовой (млн <sup>-1</sup> )			День года			Фаза, день года
	Минимум	Максимум	Амплитуда	Годового минимума	Весеннего перехода	Осеннего перехода	
“ZOTTO”	-18.4±1.1	8.5±0.4	26.9±1.1	212±2.0	149±6.0	279±4.0	130
“East Trout Lake”	-14.8±0.8	7.3±0.5	22.1±1.3	220±3.0	150±6.0	290±3.0	140
“Fraserdale”	-15.6±1.2	8.1±0.9	23.7±1.5	225±2.0	151±7.0	294±3.0	143
“Lac La Biche”	-14.9±0.8	8.4±0.9	23.3±1.3	213±1.0	141±4.0	286±3.0	145
“Egbert”	-18.3±1.8	9.9±0.8	28.2±2.2	216±3.0	145±4.0	289±2.0	144

Выявленные различия между станциями мониторинга определяются рядом факторов. Во-первых, в районе обсерватории “ZOTTO” регистрируются самые низкие летние концентрации  $\text{CO}_2$ , что объясняется интенсивным поглощением атмосферного углерода растительным покровом, который покрывает 90% футпринта для измерений на мачте обсерватории

“ZOTTO”. Так, по оценкам E.D. Schulze и др. (2002) и J. Lloyd и др. (2002) годовая величина стока атмосферного CO<sub>2</sub> варьирует от +43 ... +62 г С м<sup>2</sup>/г в болотных экосистемах, до +145 ... +163 г С м<sup>2</sup>/г в сосняках, а в темнохвойном лесу она может достигать – 270 г С/м<sup>2</sup> за вегетационный сезон (апрель-ноябрь) (Roser et al., 2002). При этом фаза сезонности концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>, которая косвенно свидетельствует о продолжительности вегетационного сезона, в районе обсерватории “ZOTTO” практически на две недели короче, чем в бореальном поясе Северной Америки. Сокращение фазы наблюдается преимущественно в осенний период. Однако, величина стока атмосферного CO<sub>2</sub> в рассматриваемых регионах Канады находится в том же диапазоне значений как в центральной части Сибири либо ниже (таблица 5.3). Также необходимо отметить, что минимум концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в районе обсерватории “ZOTTO” регистрируется в среднем на неделю раньше, чем в бореальной зоне Северной Америки (таблица 5.4). Это может быть обусловлено как более коротким вегетационным сезоном в Сибири, так и более ранним наступлением максимума в высоте ПСА, который по мнению атмосферных исследователей существенно влияет на концентрацию CO<sub>2</sub> (Denning et al., 1995).

Во-вторых, на годовое распределение концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в исследуемых районах может влиять их географическое положение, оказывающее существенное влияние на процессы энерго-массообмена в системе «океан – суша – атмосфера» (Environment and Climate Change Canada). Так, обсерватория “ZOTTO” находится в континентальной части Евразии (преобладание западного переноса) на расстоянии около 2100 км от морей Северного Ледовитого Океана и на значительном удалении от Северной Атлантики, что минимизирует вклад морских воздушных масс в годовой ход концентрации CO<sub>2</sub> (Kozlova et al., 2008). Восточная часть бореальной зоны Канады (станции “Fraserdale” и “Egbert”) характеризуется влажным климатом, который определяется поступлением воздушных масс с океана, содержащих меньшее количество углекислоты в воздухе, что

объясняет, в частности, более низкие зимние концентрации  $\text{CO}_2$  даже в условиях значительных антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$ . Регион, где расположены станции “East Trout Lake” и “Lac La Biche”, как и район обсерватории “ZOTTO”, характеризуется умеренным континентальным климатом и находится в материковой зоне, однако летние концентрации  $\text{CO}_2$  существенно выше, тогда как зимние – ниже или соответствуют уровню в центральной части Сибири.

Роль континентального стока в динамике концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , регистрируемой на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”, прослеживается при сравнении со станцией “Shetlands”, расположенной на той же географической широте ( $60.28^\circ$  с.ш.,  $1.28^\circ$  з.д.) в Северной Атлантике (рисунок 5.10). В условиях морского климата Шетландских островов влияние наземных экосистем и антропогенных источников на концентрацию атмосферного  $\text{CO}_2$  минимально, а ее изменение определяется глобальными процессами зональной циркуляции атмосферы и стоком в океан (Winderlich, 2012). Годовая динамика концентрации  $\text{CO}_2$  в районе станции “Shetlands” может рассматриваться как типичная для части океанической акватории Северного полушария, находящейся на  $60^\circ$  с.ш.

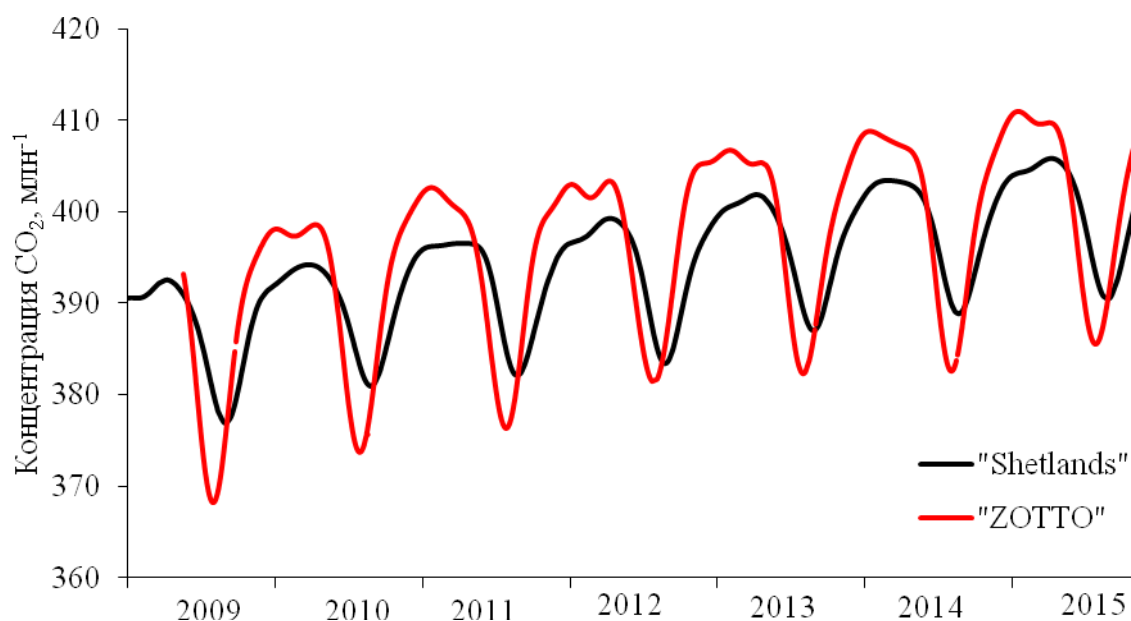


Рисунок 5.10 – Выровненные дневные значения концентрации  $\text{CO}_2$  на обсерватории “ZOTTO” и станции “Shetlands”.

Сравнительный анализ годового хода концентраций  $\text{CO}_2$  на основе шести лет (2009 – 2015 гг.) показал, что концентрация атмосферного  $\text{CO}_2$  в центральной части Сибири (обсерватория “ZOTTO”) в зимнее время выше на  $4.8 \pm 1.6$  млн<sup>-1</sup> по сравнению с районом станции “Shetlands”. Расположение обсерватории “ZOTTO” в центре континента определяет повышенные значения зимнего содержания диоксида углерода в ПСА, вследствие переноса воздушных масс с территорий, где осуществляются значительные антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу в период отопительного сезона (Панов и др., 2011), и зимнего дыхания наземных экосистем. Это подтверждают и результаты исследований концентрации  $\text{CO}_2$  на многочисленных постах мониторинга ПГ в Западной Сибири – около 400 млн<sup>-1</sup> (Аршинов и др., 2012).

В летний период наблюдается обратная картина: содержание диоксида углерода в районе обсерватории “ZOTTO” ниже, чем в районе станции “Shetlands”, на  $9.2 \pm 2.2$  млн<sup>-1</sup>. Данный факт свидетельствует о том, что в теплый период континентальные районы (в том числе район обсерватории “ZOTTO”) являются стоком для атмосферного углерода за счет фотосинтетической ассимиляции атмосферного  $\text{CO}_2$  наземными экосистемами, который более выражен в Сибири по сравнению с Шетландскими островами, где преимущественный вклад вносит газообмен между атмосферой и морской средой. При этом наблюдаемое смещение между временем наступления летних минимумов и зимних максимумом концентрации  $\text{CO}_2$  на рассматриваемых станциях отражает период перемещения воздушных масс по широте.

#### 5.4. Заключение к главе 5

В результате измерений на обсерватории “ZOTTO” установлено, что концентрация атмосферного  $\text{CO}_2$  имеет отчетливо выраженный годовой ход.



Ее ежегодное снижение начинает фиксироваться с конца апреля, достигает своего годового минимума в конце июля начале августа, с середины августа наблюдается ее постепенное повышение до ежегодного максимума в декабре – январе.

На основе семилетних наблюдений (май 2009 – январь 2016 гг.) определена годовая амплитуда концентраций диоксида углерода в рассматриваемом районе Сибири – она составила  $26.4 \pm 0.8$  млн<sup>-1</sup>, при этом тенденции к ее возрастанию, которая отмечается в Северном полушарии, за исследуемый период не выявлена. Полученная нами величина близка к таковым показанным для территории Западной Сибири (от 24 до 30 млн<sup>-1</sup>), но больше (в среднем на 3.8 млн<sup>-1</sup>), чем в бореальном поясе Северной Америки. Тогда как, что фаза сезонности концентрации CO<sub>2</sub>, которая косвенно свидетельствует о продолжительности вегетационного сезона, в районе обсерватории “ZOTTO” короче, кроме того нами зафиксировано ее увеличение со скоростью 1.6 дней в год.

Главными факторами, определяющими особенности годовой динамики атмосферного CO<sub>2</sub> в районе обсерватории “ZOTTO” по сравнению с бореальным поясом Северной Америки, являются: 1) положение обсерватории в глубине континента вне значимого влияния морского климата и, как следствие, большее изъятие атмосферного CO<sub>2</sub> в процессе фотосинтеза при переносе воздушных масс или, наоборот, его поступление из антропогенных источников в зимний период; и 2) высокая поглотительная способность растительных экосистем, которые на 90% составляют сезонный футпринт обсерватории “ZOTTO”. Значительный вклад внутриконтинентальных наземных экосистем в процессы годовой динамики концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> отчетливо проявился при сравнении ее годового хода в районе обсерватории “ZOTTO” и станции “Shetlands” (Шетландские острова), расположенных на одной географической широте (60° с.ш.).

## ГЛАВА 6. РОСТ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО CO<sub>2</sub> НАД СРЕДНЕТАЕЖНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ ПРИЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ

### 6.1. Среднемноголетняя тенденция увеличения концентрации CO<sub>2</sub>

Для изучения временного тренда концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> на более длительном временном масштабе дополнительно к нашим наблюдениям, которые были проведены с мая 2009 по январь 2016 гг., мы привлекли измерения на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” с ноября 2005 г. по май 2007 г. (Kozlova et al., 2008) и данные по содержанию атмосферного CO<sub>2</sub> в образцах воздуха, взятых в стеклянные емкости с высоты 301 м с апреля 2008 по декабрь 2010 гг. Поскольку оценка тенденции увеличения концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> выполнялась с использованием измерений, полученных различными методами, а именно в непрерывном режиме двумя разными системами – газовым анализатором NDIR CO<sub>2</sub> analyzer (Siemens AG, Ultramat 6F) и газоаналитическим комплексом EnviroSense 3000i (Picarro, США, Inc.), и с помощью лабораторных анализа воздуха из стеклянных емкостях, методом масс-спектрометрии, то первоначально, нами был проведен регрессионный анализ между параллельными измерениями концентрации CO<sub>2</sub> в непрерывном режиме и в стеклянных емкостях (эти периоды выделены серыми областями на рисунке 6.1).

Результаты регрессионного анализа показали, что различия в измерениях составляют менее 3% (рисунок 6.2), что позволяет нам использовать весь массив накопленных данных на обсерватории “ZOTTO” для исследования линейного тренда и скорости роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub>.

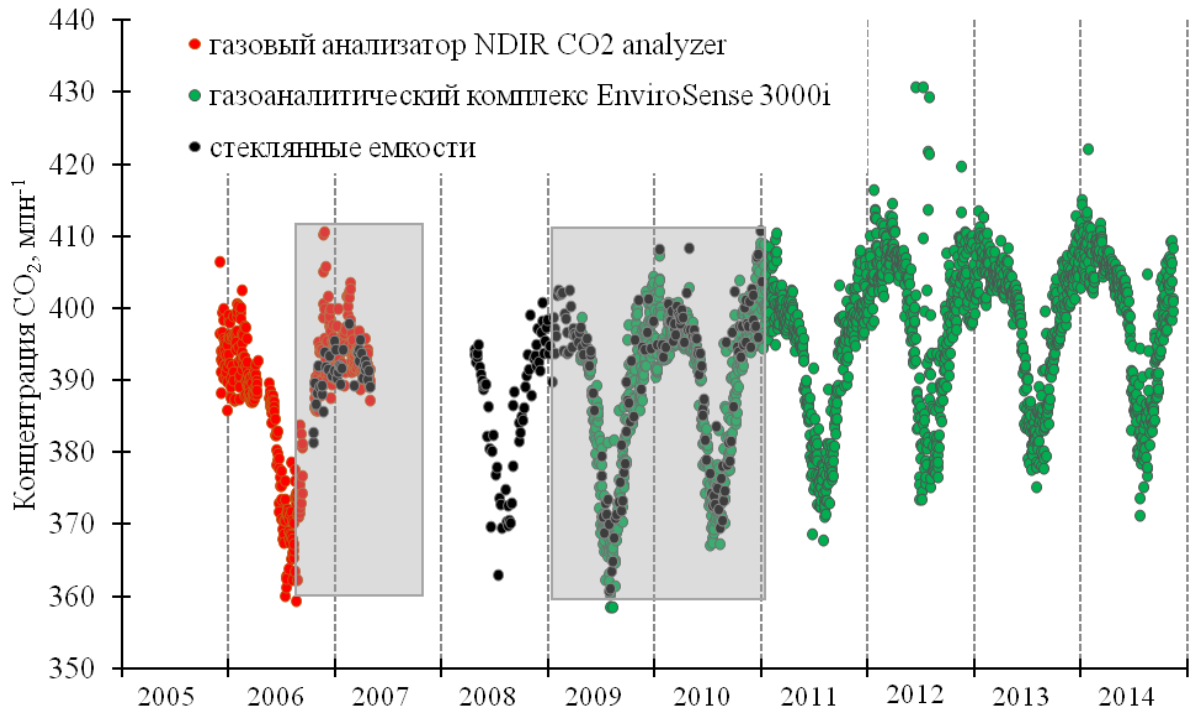


Рисунок 6.1 – Средние дневные концентрации  $\text{CO}_2$ , полученные разными методами на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” с ноября 2005 по ноябрь 2014.

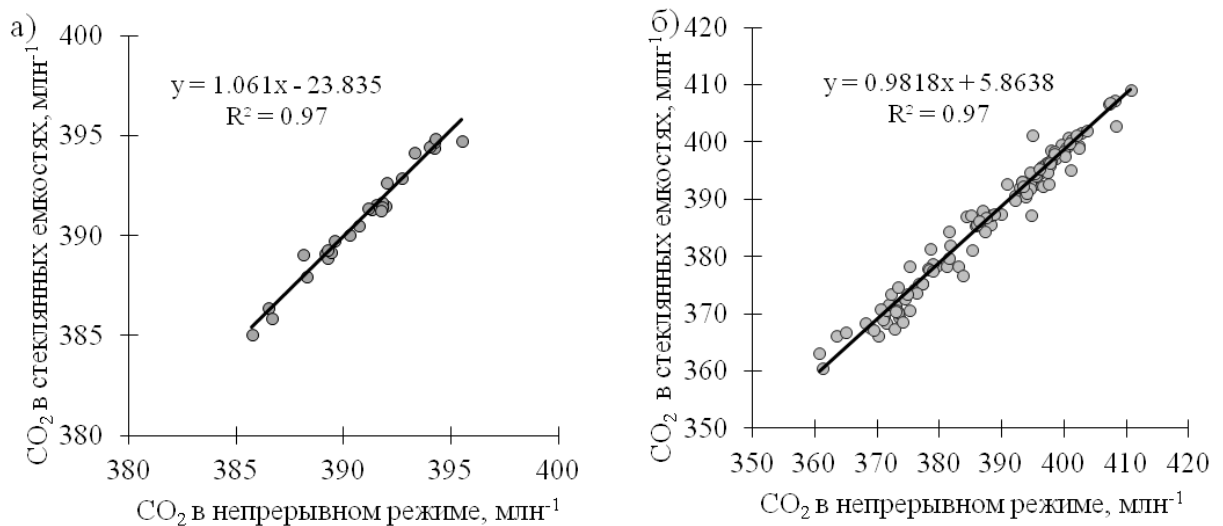


Рисунок 6.2 – Результаты регрессионного анализа между параллельными измерениями концентрации  $\text{CO}_2$  на высотной мачте обсерватории “ZOTTO”. а) газоанализатор NDIR  $\text{CO}_2$  analyzer и стеклянные емкости, б) газоанализатор EnviroSense 3000i и стеклянные емкости.

Временной тренд увеличения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  определялся коэффициентами линейного уравнения в правой части функции (2.1).

Установлено, что за десятилетний период измерений (ноябрь 2005 – январь 2016 гг.) средняя величина роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  составила  $2.04 \pm 0.04$  млн<sup>-1</sup> в год (рисунок 6.3) и соответствовала ранее приведенной отдельно для 2006 – 2007 гг. ( $2.02$  млн<sup>-1</sup> в год, Winderlich, 2012), но была значительно ниже чем в 2009–2011 гг. ( $2.62$  млн<sup>-1</sup> в год, Kozlova et al., 2008). Выявленное увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  по данным измерений на обсерватории “ZOTTO” не отличался от такового ( $2.0 \pm 0.5$  млн<sup>-1</sup> в год) полученного М. Sasakawa и др. (2013) в рамках самолетного зондирования атмосферы над районом станции “Березоречка” ( $56^\circ 08'$  с.ш.,  $84^\circ 19'$  в.д.), расположенной Западной Сибири. В результате авиационных мониторинга атмосферы также было установлено, что абсолютные значения линейного тренда роста концентрации  $\text{CO}_2$  в ПСА выше, чем в нижней части свободной тропосферы, что хорошо согласуется с результатами подобных исследований состава атмосферы над европейской частью России (район поселка Фёдоровское) (Van der Laan et al., 2014). Так, увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в западной части России на высоте 100 м составило  $1.98 \pm 0.15$  млн<sup>-1</sup> в год, а на высоте 3000 м –  $1.76 \pm 0.08$  млн<sup>-1</sup> в год за период с 1998 по 2008 гг. По мнению авторов, эти различия обусловлены «эффектом выпрямления атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$ ». Физический механизм этого эффекта заключается в том, что в теплое время года концентрация  $\text{CO}_2$  снижается одновременно как за счет поглощения при фотосинтезе, так и перемешивании в высоком ПСА, а в холодный период года, наоборот – увеличивается в результате выделения при зимнем дыхании экосистем и из антропогенных источников (отопительный сезон), и накоплении  $\text{CO}_2$  в низком ПСА. Следовательно, чем ниже высота измерения концентрации  $\text{CO}_2$ , тем сильнее влияние подстилающей поверхности и тем выше абсолютная величина временного тренда.

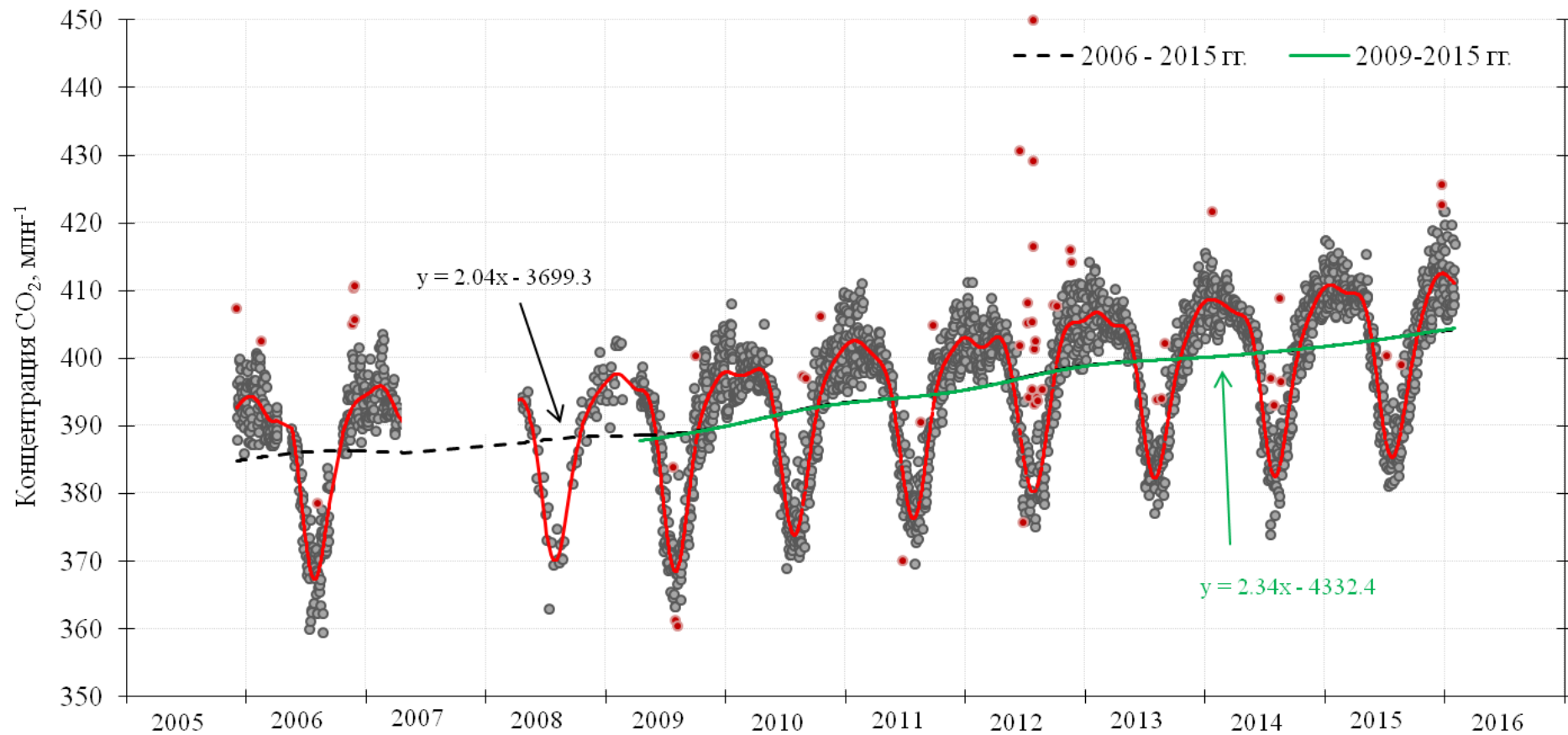


Рисунок 6.3 – Временная динамика и тренд роста концентрации  $\text{CO}_2$ . Серые точки – дневные средние концентрации  $\text{CO}_2$ , красные точки – дневные средние концентрации  $\text{CO}_2$ , лежащие за пределами  $\pm 3\delta$ , черная пунктирная кривая – временной тренд  $\text{CO}_2$  с декабря 2005 по январь 2016 гг., зеленая кривая – временной тренд  $\text{CO}_2$  с мая 2009 по январь 2016 гг.

Существенное влияние на концентрацию атмосферного  $\text{CO}_2$  оказывают лесные пожары, которые нарушают углеродный баланс экосистем и сдвигают его в сторону увеличения эмиссии  $\text{CO}_2$ , а также сокращают площадь, покрытую лесной растительностью (Швиденко и др., 2011). Так, при исключении из нашего анализа измерений концентрации  $\text{CO}_2$ , полученных в 2012 г., когда из-за крупных пожаров в окрестностях обсерватории “ZOTTO” уровень атмосферного  $\text{CO}_2$  был аномально высоким, то величина временного тренда роста за весь период (2006-2015 гг.) снижалась на  $0.12 \text{ млн}^{-1}$ , составляя  $1.92 \pm 0.03 \text{ млн}^{-1}$  в год. Если рассматривать, что  $1 \text{ млн}^{-1}$  соответствует  $2.120 \text{ Гт С}$  (Le Quere et al., 2016), то мы можем предположить, что за 2012 год в результате природных пожаров в атмосферу могло поступить до  $0.21 \text{ Гт С}$ . Мы рассчитали среднегодовое увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” отдельно для периода с 2006 по 2011 гг., то есть до крупномасштабных пожаров в Сибирском регионе (Тимохина и др., 2015). Полученная величина оказалась значительно ниже ( $1.42 \pm 0.06 \text{ млн}^{-1}$  в год) по сравнению с показанной для всего периода наблюдений ( $2.04 \pm 0.04 \text{ млн}^{-1}$  в год). При этом, линейный тренд увеличения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , вычисленный за 7 лет, а именно с мая 2009 по январь 2016 ( $2.34 \pm 0.06 \text{ млн}^{-1}$  в год), наоборот, превышал аналогичный показатель за 10 лет. Показанные результаты дают основание предполагать, что влияние пожаров на содержание диоксида углерода, вероятно, проявилось не только в увеличении эмиссии  $\text{CO}_2$  в 2012 г., но и в сокращении площади фотосинтезирующей растительности в среднетаежной подзоне Сибири. Однако, как показано в главе 5, значимых изменений в годовой амплитуде концентрации  $\text{CO}_2$  не отмечается, поэтому это предположение остается дискуссионным и требует дополнительных исследований.

Средняя тенденция увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” за последние 10 лет ( $2.04 \pm 0.4 \text{ млн}^{-1}$  в год) была незначительно выше показанной на основе модельных расчетов для всего Северного полушария ( $1.96 \pm 0.05 \text{ млн}^{-1}$  в год) и практически не отличается от

ее показателя на мировом уровне ( $2.28 \text{ млн}^{-1}$  в год) (Schneising et al., 2014; NOAA. National Center for Environmental Information).

За шесть полных лет непрерывного мониторинга содержания ПГ на обсерватории “ZOTTO” среднегодовая концентрация  $\text{CO}_2$  в приземной атмосфере возросла с  $391.9 \pm 9.3$  (2010 г.) до  $403.1 \pm 9.5$  (2015 г.)  $\text{млн}^{-1}$ , таким образом при таком способе расчета, ее ежегодное увеличение составило  $2.24 \text{ млн}^{-1}$  в год. Полученная нами величина роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере Сибири оказалась выше, чем вычисленная таким же методом на российских фоновых станциях Териберка ( $1.93 \text{ млн}^{-1}$  в год) и Тикси ( $2.17 \text{ млн}^{-1}$  в год) за этот же период времени (Обзор состояния ..., 2016). Обе российские станции расположены на побережье морей Северного Ледовитого Океана: Баренцевого (Териберка,  $69^\circ 12'$  с.ш.,  $35^\circ 06'$  в.д.) и Лаптевых (Тикси,  $71^\circ 35'$  с.ш.,  $128^\circ 55'$  в.д.), где влияние антропогенных источников минимально. Поэтому концентрации  $\text{CO}_2$ , регистрируемая на этих станциях, принимаются как ее фоновый показатель. Среднегодовое содержание атмосферного  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” в течение исследуемых шести лет было несущественно, но стабильно выше (от  $0.1$  до  $1.3 \text{ млн}^{-1}$  в год), чем на фоновых станциях (таблица 6.1). Исключение составил 2012 год, когда общее годовое содержание  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” было выше на  $1.6 - 2.0 \text{ млн}^{-1}$  выше.

Наибольший вклад в глобальную эмиссию  $\text{CO}_2$  из антропогенных источников в 2015 году вносили такие страны, как Китай (29%), США (15%), страны Евросоюза (10%) и Индия (6.3%) (Le Quere et al., 2016). Так, рост атмосферного  $\text{CO}_2$  в наиболее развитых индустриальных районах Китая, а именно на станциях “Lin’an” (150 км от города Шанхай) и “Shangdianzi” (150 км от города Пекин) составлял  $3.7 \pm 1.2$  и  $3.5 \pm 1.5 \text{ млн}^{-1}$  в год за период с 2009 по 2011 гг., что является прямым доказательством существенного влияния промышленности Китая на глобальные антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  (Fang et al., 2014). При этом, ежегодное увеличение содержания  $\text{CO}_2$  на китайской станции “Mt. Waliguan” не превышало  $2.2 \pm 0.8 \text{ млн}^{-1}$  в год для того же

периода времени. Это обусловлено тем, что станция “Mt. Waliguan” располагается в горах (3816 м над уровнем моря), поэтому рассматривается научным сообществом этой страны как фоновая станция для всего Евразийского континента (Fang et al., 2014). Таким образом, средняя скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири практически в два раза ниже, чем в экономически развитых районах Китая, однако, она не отличается от таковой, показанной для фоновых условий Евразийского континента.

Таблица 6.1 – Среднегодовые значения (CO<sub>2</sub>) и годовой прирост (ΔCO<sub>2</sub>) концентрации CO<sub>2</sub> в районе обсерватории “ZOTTO” и российских станциях. Все значения приведены в млн<sup>-1</sup> в год.

	“ZOTTO”		Териберка*		Тикси*	
	CO <sub>2</sub>	ΔCO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	ΔCO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	ΔCO <sub>2</sub>
2010	391.9		392.3			
2011	394.4	2.5	394.1	1.8	394.2	
2012	398.0	3.6	396.4	2.3	396.0	1.8
2013	399.5	1.5	398.6	2.2	399.1	3.1
2014	401.1	1.6	400.4	1.8	400.6.	1.5
2015	403.1	2.0	401.8	1.4	403.0	2.4

\*Цитировано по Обзор состояния ..., 2016

Сравнение среднегодового темпа роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в центральной части Сибири и в некоторых странах Европейского Союза показало, что содержание CO<sub>2</sub> нарастет с относительно одинаковой скоростью (таблица 6.2). Незначительные различия обусловлены особенностями местоположения станций. Так например, в высокогорье Альп (“Jungfraujoch”) или на вершине горы Охсенкопф, в Германии (“Ochsenkopf”), среднегодовой рост концентрации CO<sub>2</sub> ниже, чем в городских условиях (“Egham”).



Таблица 6.2 – Среднегодовой временной тренд концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> для различных станций Европы и района обсерватории “ZOTTO”

Название страны	Название станции	Географические координаты, высота над уровнем моря, м	Величина тренда, млн <sup>-1</sup> в год	Период определения тренда	Источник
Польша	“Bialystok”	53.80 с.ш., 23.90 в.д., 150	2.11±0.64	Июль 2005 – Декабрь 2008	H. Chen et al., 2012
Швейцария	“Jungfraujoch”	46°32'53" с.ш. 7°59'20" в.д., 3580	1.85±0.09	Декабрь 2007 – Декабрь 2011	Van der Laan-Luijkx et al., 2012
Франция	“Trainou”	47°57'53" с.ш., 2°06'45" в.д., 131	2.2±n/a	Июль 2006 – Июль 2012	M. Schmidt et al., 2014
Нидерланды	“Cabaum”	51.97 с.ш., 4.92 в.д., 213	2.00±0.24	Январь 2005 – Декабрь 2009	Vermeulen et al., 2011
Венгрия	“Hegyh'ats'al”	46°57' с.ш., 16°39' в.д., 248	1.95 ± 0.07	Январь 1993 – декабрь 2009	Haszpra and Barcza, 2010
Великобритания	“Egham”	51°25' с.ш., 0°33' з.д., 30	2.50±n/a	Январь 2000 – Декабрь 2012	Hernández-Paniagua et al., 2015
Германия	“Ochsenkopft”	50°01' с.ш., 11°48' в.д., 163	1.60±0.47	Июнь 2006 – Декабрь 2008	Thompson et al., 2009
Западная Сибирь	“ZOTTO”	60°48' с.ш., 89°21' в.д., 114	2.04±0.04	Январь 2006 – Январь 2016	

При рассмотрении временного тренда роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в отдельные сезоны года за период с ноября 2005 по январь 2016 гг. было установлено, что темп ее увеличения в летний период ( $2.16 \text{ млн}^{-1}$  в год), который характеризуется поглощением диоксида углерода в результате фотоассимиляции биоценоза, достоверно выше (при  $p < 0.01$ ), чем в зимние месяцы ( $1.85 \text{ млн}^{-1}$  в год) (рисунок 6.4). При этом, летняя скорость роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  также выше, чем ее осенний темп ( $2.02 \text{ млн}^{-1}$  в год) и полностью соответствует таковому за весенний период ( $2.16 \text{ млн}^{-1}$  в год).

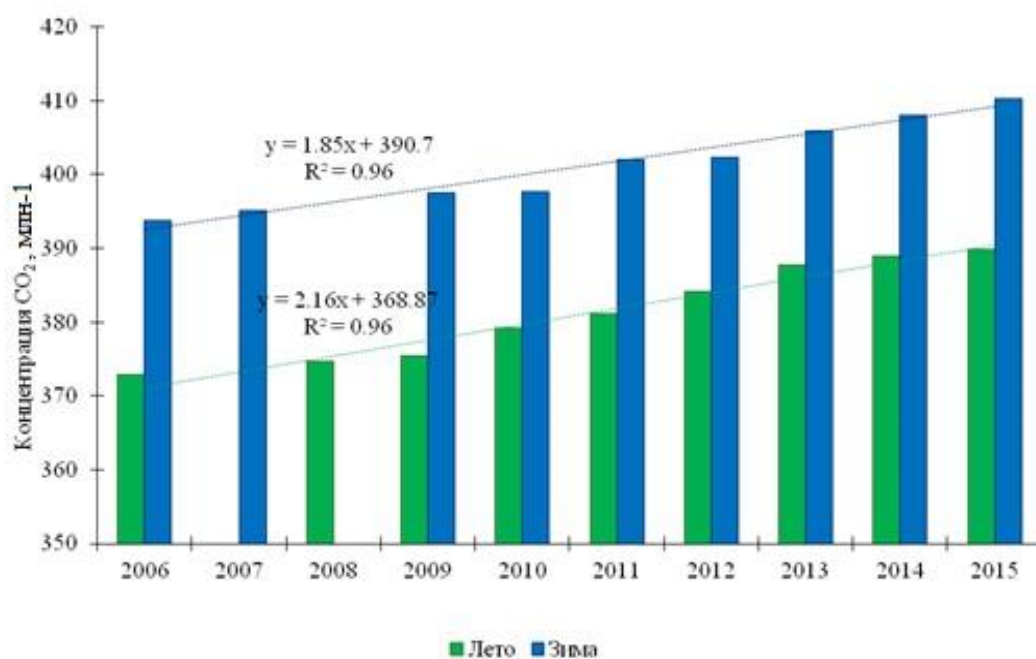


Рисунок 6.4 – Временной тренд концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в зимний (Декабрь-Февраль) и летний (Июнь-Август) периоды года по данным измерений на обсерватории “ZOTTO”.

Высокая скорость летнего роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , вероятно, свидетельствует о существенной пирогенной уязвимости и нарушении лесного покрова рассматриваемого региона, что определяет повышенное выделение  $\text{CO}_2$  из наземных экосистем. Мы предполагаем, что дополнительно выделенный углерод не успевает поглощаться в процессе фотосинтеза и задерживается в приземной атмосфере. Преобладание скорости роста концентрации  $\text{CO}_2$  в летний

период также было показано в других районах Северного полушария. Так, отмечается, что в Венгрии с 1994 до 2003 года максимальная скорость роста  $\text{CO}_2$  регистрировалась летом, что авторы связывают с частыми жаркими засушливыми условиями, которые привели к сокращению продуктивности лесов и снижению поглощения ими атмосферного  $\text{CO}_2$ . Затем (после 2003 года) климатические условия нормализовались и с этого периода рост концентрации  $\text{CO}_2$  стал преобладать в зимний период (Hazpra et al., 2008).

## 6.2. Межгодовая вариабельность скорости роста концентрации $\text{CO}_2$

Как видно на рисунок 6.3, за исследуемый период рост концентрации  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” не имел строгой линейной зависимости. В отдельные годы возрастание  $\text{CO}_2$  было существенно выше либо ниже, чем среднегодовой показатель. В нашем исследовании скорость роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  отдельно для каждого года определялась через расчет производной от ее долговременной тенденции, согласно методу, предложенному K.W. Thoning и др. (1989) (детальное описание метода представлено в главе 2).

Скорость роста концентрации  $\text{CO}_2$  с ноября 2005 по январь 2016 гг. изменялась от  $-0.7$  до  $4.1$  млн<sup>-1</sup> в год. Однако, длительный пробел в данных (апрель 2007 – апрель 2008) мог привести к неверным оценкам с ноября 2006 г. по март 2008 г. Поэтому, в дальнейшем анализе мы использовали только результаты, полученные с апреля 2008 по январь 2016 гг. (рисунок 6.5). Таким образом, за более короткий период скорость роста атмосферного  $\text{CO}_2$  варьировала от  $0.3$  до  $4.1$  млн<sup>-1</sup> в год.

Аналогичная тенденция в изменении темпа роста  $\text{CO}_2$  наблюдалась на глобальном масштабе (на примере станции “Mauna Loa”,  $19.54^\circ$  с.ш.,  $155.58^\circ$  з.д.), однако, диапазон флуктуаций был значительно ниже (от  $1.6$  до  $2.7$  млн<sup>-1</sup> в год).

Это свидетельствует о том, что изменения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  во внутриконтинентальных районах Северного полушария в большей степени определяются биогенными (фотоассимиляционным и респираторным) потоками углерода в экосистемах, которые сильно зависят от климатических факторов, тогда как станция “Mauna Loa” расположена в океане, где влияния наземной растительности сглаживается (Keeling et al., 1996).

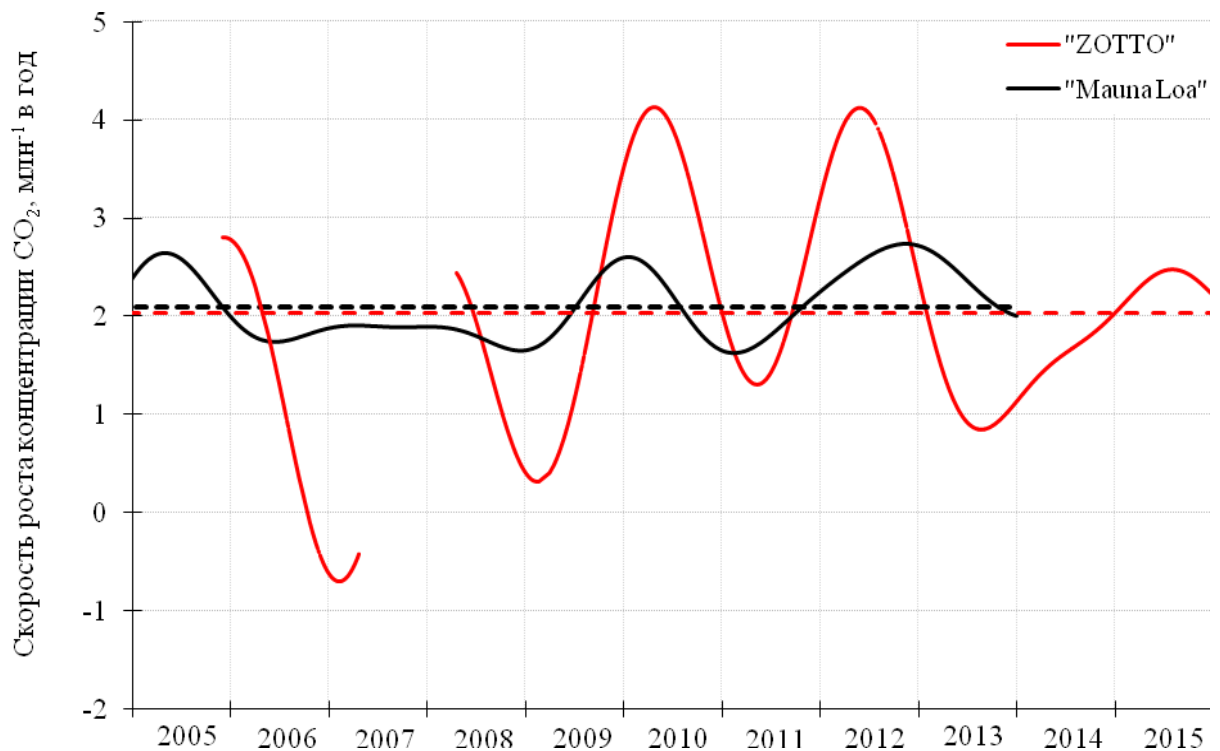


Рисунок 6.5 – Скорость роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” и “Mauna Loa”. Пунктирными линиями показаны средние скорости роста концентрации  $\text{CO}_2$  на рассматриваемых станциях. Данные для станции “Mauna Loa” предоставлены Лабораторией Исследования Земли (<https://www.esrl.noaa.gov/>).

Необходимо пояснить, что наблюдения за концентрацией  $\text{CO}_2$  на станции “Mauna Loa” до 1980 г. принимались как эталонная характеристика ее глобального распределения, а позже стали использовать расчетный показатель на основе измерений  $\text{CO}_2$  с сети морских и океанических станций (NOAA. National Center for Environmental Information). Благодаря тому, что “Mauna Loa” находится на вершине горы одного из гавайских островов (3400 м над уровнем моря),

прямое воздействие наземных экосистем (природного стока  $\text{CO}_2$ ) и антропогенных источников на динамику концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  значительно сокращается и, следовательно, ее изменения определяются преимущественно глобальными процессами циркуляции атмосферы (Keeling et al., 1989). Концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на станции “Mauna Loa” мало отличается от таковой, рассчитываемой на основе измерений с сети морских и океанических станциях ( $r=0.95$  для периода 1959-2015 (Le Quere et al., 2016)), поэтому часто в целях упрощения расчетов используют измерения со станции “Mauna Loa” в качестве показателя глобального роста концентрации  $\text{CO}_2$ . В связи с этим для проведения сравнительного анализа тенденций увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” с общемировой, приведенной на рисунке 6.5, нами была взята именно эта станция.

Важно отметить, что флуктуации скорости роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  на станции “Mauna Loa”, в значительной степени определяются колебаниями климатических параметров в результате действия Южной (Эль-Ниньо) и Северной (Ла-Ниньо) осцилляции Тихого океана, однако биогеохимические механизмы, лежащие в основе такого воздействия, остаются пока слабо понятны. В динамике углерода и его атмосферном содержании эффекты Эль-Ниньо и Ла-Ниньо особенно сильно проявляются в тропических лесах. Так, в годы Эль-Ниньо возрастает выделение  $\text{CO}_2$  (усиливается дыхание экосистем), а в годы Ла-Ниньо, наоборот, его поглощение (Langenfelds et al., 2002).

Сравнения скорости роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в бореальном поясе Сибири (обсерватория “ZOTTO”) и Северной Америки (станция “Fraserdale” и “East Trout Lake”), а также Северной Атлантики (станция “Shetlands”), выявило идентичный характер нарастания атмосферного  $\text{CO}_2$ , при этом наблюдается различие во времени наступления максимумов и минимумов до нескольких месяцев, что, обусловлено особенностями атмосферной циркуляции (рисунок 6.6) (Keeling et al., 1989).

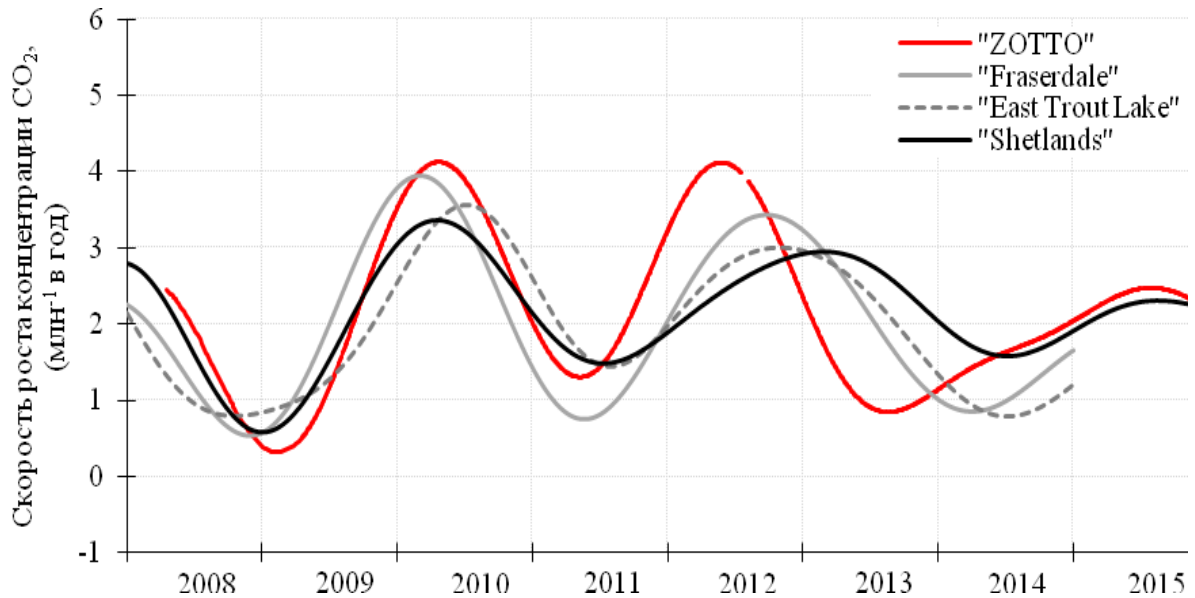


Рисунок 6.6 – Скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в различных районах бореального пояса: центральная часть Сибири (обсерватория “ZOTTO”) и Северная Америка (станции “Fraserdale” и “East Trout lake”), и Северной Атлантики (станция “Shetlands”).

Наименьший прирост концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири (0.3 млн<sup>-1</sup>), как и в бореальном поясе Северной Атлантики, отмечался в 2009 году. Это объясняется высокой поглотительной способностью растительности наземных экосистем на глобальном масштабе (-4.6 Гт С (Winderlich, 2012)) в течение более «теплого» и влажного вегетационного сезона 2009 г., наблюдаемом как в районе исследования, так и на территории России в целом (Обзор состояния ..., 2011). При этом стоит отметить, что в 2009 году под влиянием мирового экономического кризиса произошло снижение промышленных выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу на территории России, однако в 2010 году их рост восстановился до уровня 4.8% и превысил глобальный показатель более чем в два раза (Первый двухгодичный ..., 2014). Вероятно, это была одна из причин почему в последующем году, в 2010, скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> в центральной Сибири существенно возросла, составляя 4.1млн<sup>-1</sup>. Темп рост концентрации CO<sub>2</sub> над

среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири был самый высокий среди рассматриваемых станций бореального пояса (рисунок 6.6) и значительно выше такового, показанного в 2010 году для Северного полушария в целом ( $3 \text{ млн}^{-1}$ ) (Guerlet et al., 2013). Мы предполагаем, что это увеличение обусловлено, главным образом, огромными эмиссиями  $\text{CO}_2$  ( $0.89 \pm 0.20 \text{ Гт С}$ ) в период катастрофических пожаров в Европейской части России и Восточной Европе (Guerlet et al., 2013). Также вследствие задымленности и аномальной жары в этих регионах могло произойти сокращение аккумуляции  $\text{CO}_2$  растительностью. В результате западного переноса воздушные массы, содержащие продукты горения от массовых лесных пожаров, поступали из европейской части России в Западносибирский регион. При этом в районе обсерватории “ZOTTO” на протяжении вегетационного периода 2010 года, наоборот, регистрировалось холодная дождливая погода, что вероятно, могло снизить фотоассимиляцию углерода.

В 2011 году отмечалось замедление скорости роста концентрации  $\text{CO}_2$  на всей территории средних широт Северного полушария, включая центральную часть Сибири, где она снизилась до  $1.3 \text{ млн}^{-1}$  (рисунок 6.6). Согласно метеорологическим данным, полученным на обсерватории “ZOTTO” в этот год прослеживались благоприятные природные условия для функционирования биоценозов, что также способствовало сокращению скорости роста концентрации  $\text{CO}_2$ .

Второй максимальный пик скорости роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  в исследуемых регионах был зафиксирован в 2012 году. Однако, над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири темп роста  $\text{CO}_2$  был самым высоким ( $4.1 \text{ млн}^{-1}$ ). В летний период 2012 года в результате аномальной засухи и жары в районе обсерватории “ZOTTO”, как и в Красноярском крае в целом, регистрировались крупномасштабные затяжные природные пожары, которые достигли своей наивысшей активности к 24–26 июля. В этот период очаги пожаров наблюдались на расстоянии 10 - 13 км от обсерватории “ZOTTO”. Вследствие пожаров в атмосферу над Сибирью поступило от 0.28 до 0.55 Гт С,

что соответствует от 60 до 110% всех его антропогенных выбросов России (Konovalov et al., 2014). Поэтому низкий темп роста концентрации  $\text{CO}_2$ , регистрируемый по данным измерений на обсерватории “ZOTTO” ( $0.9 \text{ млн}^{-1}$ ) в последующем, 2013 году, вероятно, обусловлен восстановлением газового состава атмосферы над Сибирью после поступления в нее такого большого количества  $\text{CO}_2$ . Следовательно, полученное низкое значение скорости роста концентрации  $\text{CO}_2$  в 2013 г. не является проявлением активного стока углерода в лесах региона в этот год.

В последние два года, а именно 2014 г. и 2015 г., регистрировалось монотонное нарастание скорости роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , достигая уровня  $2.5 \text{ млн}^{-1}$  в 2015 году. Необходимо отметить, что в 2015 году на планете началось сильное явление Эль-Ниньо, которое продолжается в настоящее время. Оно является одним из сильнейших с 1950 г. и сопровождается рекордно высокими колебаниями температуры воздуха (Betts et al., 2016). Несмотря на то, что глобальные антропогенные эмиссии  $\text{CO}_2$  в 2014 – 2015 гг. оставались относительно неизменными, в 2016 году зафиксирован аномально высокий прирост  $\text{CO}_2$ , составивший  $3.36 \text{ млн}^{-1}$ , чему способствовало именно явление Эль-Ниньо и крупные лесные пожары в Индонезии (Le Quere et al., 2016; NOAA. National Center for Environmental Information). Поэтому, мы ожидаем, что в районе обсерватории “ZOTTO” также будет ускоряться темп роста атмосферного диоксида углерода в 2016 году.

### 6.3. Заключение к главе 6

Согласно наблюдения на обсерватории “ZOTTO” регистрируется неуклонный рост концентрации  $\text{CO}_2$ . Среднегодовая концентрация  $\text{CO}_2$  над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири возросла с  $391.9 \pm 9.2$  (2010 г.) до  $403.1 \pm 9.5$  (2015 г.)  $\text{млн}^{-1}$ .



Временной тренд роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> (на основе линейной функции) в центральной части Сибири с ноября 2005 по январь 2016 гг. ( $2.04 \pm 0.01$  млн<sup>-1</sup> в год), оказался больше, чем за период с мая 2009 по январь 2016 гг. ( $2.34$  млн<sup>-1</sup>). Показанная закономерность свидетельствует о необходимости длительных наблюдений за концентрацией CO<sub>2</sub>.

По данным измерений на обсерватории “ZOTTO” обнаружена высокая межгодовая вариабельность скорости роста концентрации CO<sub>2</sub> (от 0.3 до 4.1 млн<sup>-1</sup>), что для территории Сибири показано впервые. Максимальные темпы роста концентрации CO<sub>2</sub>, около 4 млн<sup>-1</sup>, совпадают с периодами крупных природных пожаров в Европейской части России в 2010 г. и на территории Сибири в 2012 г. Выявлено, что скорость роста концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири проявляет схожую тенденцию при сравнении ее с глобальной скоростью роста CO<sub>2</sub> (на примере станции “Mauna Loa”) за одинаковый промежуток времени, и мало отличается от таковой характерной для бореального пояса Северной Америки, где произрастают аналогичные наземные экосистемы.

## ВЫВОДЫ

1. Площадь зоны влияния для измерений концентрации  $\text{CO}_2$  на высотной мачте обсерватории “ZOTTO” достигает  $6.9 \times 10^6 \text{ км}^2$ , при этом за исследуемые 4 года (2008, 2009, 2010 и 2012) площадь 75%-футпринта изменялась от 1.9 до  $2.3 \times 10^6 \text{ км}^2$ . Наибольший вероятный вклад в формирование концентрации  $\text{CO}_2$  вносят болота, смешанные и темнохвойные леса, и сосняки.

2. Концентрация атмосферного  $\text{CO}_2$  имеет отчетливый суточный ход только в теплый период года. Наибольшая суточная амплитуда ( $21.2 \text{ млн}^{-1}$ )  $\text{CO}_2$  регистрируется вблизи подстилающей поверхности в пик вегетационного сезона. С увеличением высоты различия в содержании диоксида углерод сглаживаются ( $4.8 \text{ млн}^{-1}$  на высоте 301 м), отражая снижение локального влияния подстилающей поверхности. Выбранный нами градиентный метод определения годовой эмиссии  $\text{CO}_2$  адекватно характеризует исследуемую территорию и позволяет получить интегральный показатель интенсивности выделения  $\text{CO}_2$ , равный  $464 \pm 28.5 \text{ гС/м}^2$  в год.

3. Величина годовой амплитуды концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе над среднетаежными экосистемами Приенисейской Сибири ( $26.4 \pm 0.8 \text{ млн}^{-1}$ ) выше, чем в бореальном поясе Северной Америки в среднем на  $3.8 \text{ млн}^{-1}$ , при более короткой продолжительности вегетационного сезона. Особенности распределения концентраций атмосферного  $\text{CO}_2$  в районе обсерватории “ZOTTO” по сравнению с регионом, где расположены канадские станции, определяются положением района исследования в глубине континента Евразии везначимого влияния морского климата.

4. Скорость роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере центральной Сибири за период наблюдений с ноября 2005 по январь 2016 гг. варьировала от 0.3 до  $4.1 \text{ млн}^{-1}$  в год. Максимальные темпы роста его концентрации, около  $4 \text{ млн}^{-1}$  в год, соответствовали периодам крупных природных пожаров в Европейской части России (2010 г.) и на территории Сибири (2012 г.).

5. Динамика наблюдаемого прироста концентраций  $\text{CO}_2$  в атмосфере района исследований хорошо соотносится с измерениями на станции “Mauna Loa”, но характеризуется более выраженными годовыми флуктуациями, и мало отличается от таковой, характерной для бореального пояса Северной Америки.

6. Временной тренд роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере центральной части Сибири с мая 2009 по январь 2016 гг. составил  $2.34 \text{ млн}^{-1}$  в год и не отличался от скорости ее увеличения на глобальном масштабе ( $2.38 \text{ млн}^{-1}$ ) за этот же промежуток времени, тогда как за весь период наблюдений на обсерватории “ZOTTO” (2005 - 2016 гг.) он характеризуется меньшей величиной –  $2.04 \text{ млн}^{-1}$  в год. Данный факт свидетельствует о преимуществе длительного мониторинга концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , позволяющего исключить локальные эффекты и краткосрочные флуктуации.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

Гт С	$10^9$ тонн углерода
CO <sub>2</sub>	Углекислый газ
CH <sub>4</sub>	Метан
Млн <sup>-1</sup>	0.0001% - миллионная доля
ПСА	Пограничный слой атмосферы
ПГ	Парниковые газы
РФ	Российская Федерация
RLC	Russian Land Classes Классы подстилающей поверхности России
RF	Радиационное воздействие, radiative forcing
STILT	Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport стохастическая транспортная модель
“ZOTTO”	Zotino Tall Tower Observatory

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М.: "Мир", 1976. – 756 с.

Антамошкина, О.А. Мониторинг состояния растительного покрова зоны охвата мачты Zotto по данным дистанционного зондирования / О.А. Антамошкина и М.А. Корец // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2015. – Т.16. – № 4. – С. 814 - 818.

Арефьев В.Н. Фоновая составляющая концентрации двуокиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга “Обнинск”) / В.Н. Арефьев, Н.Е. Каменоградский, Ф.В. Кашин, А.В. Шилкин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т.50.– № 6. – с. 655 - 662.

Аршинов, М.Ю. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений / М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, Г. Иноуйе, Ш. Максюттов, Т. Мачида, А.В. Фофонов // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Вып. 22. – № 5. – С. 457 - 464.

Аршинов, М.Ю. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере / М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, Г.М. Креков, А.В. Фофонов, С.В. Бабченко, G. Inoue, T. Machida, Sh. Maksutov, M. Sasakawa, K. Shimoyama // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – № 12. – С. 1051 - 1061.

Аршинов, М.Ю. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири / М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, Г. Иноуйе, О.А. Краснов, Ш. Максюттов, Т. Мачида, А.В. Фофонов, К. Шимояма // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Вып. 22. – № 2. – С. 183 - 192.

Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS / С.А. Барталев, В.А. Егоров, Д.В.

Ершов, А.С. Исаев, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, И.А. Уваров // Исследование земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 285 – 302.

Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. Учебное пособие для вузов / В.П. Боровиков – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 288 с.

Бюллетень ВМО по парниковым газам [Электронный ресурс]. Всемирная метеорологическая организация – 2016.— № 12. – Режим доступа: [http://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=3084](http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3084) – (Дата обращения: 21.11.2016).

Ведрова, Э.Ф. Углеродный бюджет бореальных лесов Средней Сибири / Э.Ф. Ведрова, Е.А. Ваганов // Доклады Академии Наук. - 2009. - Т. 425, № 5. - С. 678 - 682.

Вивчар, А.В. Идентификация Антропогенных источников эмиссий окислов азота по расчетам лагранжевых траекторий и данным наблюдений на высотной мачте в Сибири весной-летом 2007 г. / А.В. Вивчар, К.Б. Моисеенко, Р.А. Шумский, А.И. Скороход // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2009. – Т. 45. – № 3. – С. 325 - 336.

Виноградова, А.А. Временные изменения концентрации углекислого газа и метана в городских условиях / А.А. Виноградова, Е.И. Федорова, И.Б. Беликов, А.С. Гинзбург, Н.Ф. Еланский, А.И. Скороход // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2007. – Т. 43. – № 5. – С. 651 - 663.

Глебов, Ф.З. Болота и заболоченные леса лесной зоны Енисейского левобережья / Ф.З. Глебов. – М.: Наука, 1969. – 131 с.

Глебов, Ф.З. Взаимоотношения леса и болота в таежной зоне / Ф.З. Глебов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1988. – 181 с.

Горбатенко, В.П. Циркуляция атмосферы над западной Сибирью в 1976-2004 гг. / В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитов, Н.В. Поднебесных // Метеорология и Гидрология. – 2007. – № 5. – С. 28 - 36.

Григорьев, А.А. О периодическом законе географической зональности / А.А. Григорьев, М.И. Будыко // Доклады Академии Наук СССР. – 1956. – Т. 110. – № 1. – С. 129 - 132.

Еланский, Н.Ф. Газовый состав приземной атмосферы в Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. / Н.Ф. Еланский, 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 // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 437. – № 1. – С. 90 -96.

Жуков, М.А. Ландшафтно-геоботаническая характеристика Сымского природного парка / М.А. Жуков, В.М. Телеснина, Д.А. Шахин // Изучение, сохранение и восстановление биоразнообразия экосистем на Енисейском экологическом трансекте. – М.: 2001. – С. 279 –298.

Замолодчиков, Д.Г. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия / Д.Г. Замолодчиков, В.И. Грабовский, Г.Н. Краев // Лесоведение. – 2011. – № 6. – С. 16 - 28.

Зинченко, А.В. Оценка источников метана на основе измерений его концентрации в районе добычи газа на севере Западной Сибири / А.В. Зинченко, Н.Н. Парамонова, В.И. Привалов, А.И. Решетников, В.С. Титов // Метеорология и Гидрология. – 2008. – № 1. – С. 51 - 64.

Кильдишев, Г.С. Анализ временных рядов и прогнозирование / Г.С. Кильдишев, А.А. Френкель. – М.: Статистика, 1973. – 104 с.

Климат Красноярска – Л.: Гидрометеиздат, 1982. –230 с.

Климатология. – Л.: Гидрометиздат, 1989. – 568 с.

Климченко, А.В. Запасы крупных древесных остатков в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири / А.В. Климченко, С.В. Верховец, О.А. Слинкина, Н.Н. Кошурникова // География и Природные ресурсы. – 2011. – № 2. – С. 91 - 97.

Коротков, И.А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР / И.А. Коротков // Углерод в экосистемах лесов и болот России /

Под. ред. В.А. Алексеева, Р.А. Бердси. – Красноярск: ВЦ СО РАН, 1994. – С. 29 - 47.

Крутцен, П.Й., Наблюдения малых примесей в атмосфере над территорией России с использованием железнодорожного вагона-лаборатории / П.Й. Крутцен, Г.С. Голицын, Н.Ф. Еланский, К.А.М. Бреннинкмайер, Д. Шарффе, И.Б. Беликов, А.С. Елохов // Доклады Академии Наук. – 1996. – Т. 350. – № 6. – С. 819 - 823.

Куваев, В.Б. Естественное восстановление сосновых лесов среднего Енисея после рубок / В.Б. Куваев, Д.А. Шахин, А.Н. Роденков, В.М. Телеснина. – М.: 2001. – 290 с.

Лесные экосистемы Енисейского меридиана / отв. ред. Ф.И. Плешиков. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. – 356 с.

Лукашкин, В.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / В.П. Лукашкин. М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.

Михайлов, Е.Ф. Исследование сезонной изменчивости углеродсодержащих фракций атмосферного аэрозоля Центральной Сибири / Е.Ф. Михайлов, С.Ю. Миронова, М.В. Макаров, С.С. Власенко, Т.И. Рышкевич, А.В. Панов, М.О. Андреае // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 484 - 492.

Михайлов, О.А. Сезонная динамика вертикальных потоков CO<sub>2</sub> в приземном слое атмосферы на мезо-олиготрофном болоте Средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Михайлов Олег Алексеевич. – Сыктывкар, 2013. – 22 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год. – М: Росгидромет, 2012. – 204 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2013 год. – М: Росгидромет, 2014. – 204 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2010 год. – М: Росгидромет, 2011. – 256 с.

Панов, А.В. Источники, сезонная изменчивость и траектории переноса атмосферных аэрозолей над лесными экосистемами Средней Сибири / А.В.



Панов, И. Хайнтценберг, В. Бирмили, Р. Отто, С. Чи, Г.К. Зражевская, А.В. Тимохина, С.В. Верховец, М. Андреа, А.А. Онечин // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 441. – № 5. – С. 689 - 693.

Панов, А.В. Пространственное распределение атмосферных аэрозолей над территорией Евразии в Средних и высоких широтах / А.В. Панов, И. Хайнтценберг, В. Бирмили, П. Зайферт, С. Чи, А.В. Тимохина, М.О. Андреа // География и Природные ресурсы. – 2015. – № 1. – С. 30 - 36.

Первый двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с Решением 1/СР.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных наций об изменении климата. – М.: Росгидромет, 2014. – 27 с.

Поднебесных, Н.В. Динамика циклонической и антициклонической активности над Сибирью: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30 / Поднебесных Наталья Владимировна. – Томск, 2010. – 22 с.

Пулы и потоки углерода / под. ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. – 315 с.

Расписание погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rp5.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017).

Розенберг, Г.С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) / Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков, П.М. Брусиловский. – Тольятти, 1994. - 182 с.

Семенов Е.К. и др. Теплая зима в российской Арктике и аномальные холода в Европе / Е.К. Семенов, Н.Н. Соколихина, К.О. Тудрий // Метеорология и Гидрология. – 2013. – № 9. – С. 43 - 54.

Средняя Сибирь. – М.: Наука, 1964. – 480 с.

Тимохина, А.В. Временная изменчивость концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосфере среднетаежных экосистем Сибири / А.В. Тимохина, А.С. Прокушкин, А.В. Панов, А.А. Онучин, М. Хайманн // Известия РАН. Серия географическая. – 2015. – № 2. – С. 112 - 121.

Тимохина, А.В. Динамика приземной концентрации CO<sub>2</sub> в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири / А.В. Тимохина, А.С. Прокушкин, А.А. Онучин, А.В. Панов, Г.Б. Кофман, М. Хайманн // Экология. – 2015. – № 2. – С. 110 - 119.

Тимохина, А.В. Исследование сезонной изменчивости приземной концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> над таежными экосистемами Средней Сибири / А.В. Тимохина, А.В. Панов, А.С. Прокушкин, А.А. Онучин, Я. Виндерлих // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – №6(46). – С.195 - 197.

Тимохина, А.В. Многолетний тренд концентрации CO<sub>2</sub> в приземной атмосфере над Центральной Сибирью / А.В. Тимохина, А.С. Прокушкин, А.А. Онучин, А.В. Панов, Г.Б. Кофман, С.В. Верховец, М. Хайманн // Метеорология и Гидрология. – 2015. – № 3. – С. 58 - 64.

Тимохина, А.В. Суточная и сезонная динамика концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосфере над экосистемами западной Сибири (приенисейская часть) / А.В. Тимохина, А.С. Прокушкин, А.В. Панов // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 12. – С. 83 - 88.

Харук, В.И. Лиственничники лесотундры и климатические тренды / В.И. Харук, К.Дж. Рэнсон, С.Т. Им, М.М. Наурзбаев // Экология. – 2006. – № 5.– С. 323 - 331.

Хромов, С.П. Метеорология и климатология: учебник. – 7-е изд. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: Изд-во Моск. Ун-та: Наука, 2006. – 582 с.

Чебакова, Н.М. Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность / Н.М. Чебакова, Н.Н. Выгодская, А. Арнет, Л. Белелли Маркезини, Ю.А. Курбатова, Е.И. Парфенова, Р. Валентини, С.В. Верховец, .Е.А. Ваганов, Е.-Д. Шульце // Известия РАН. Серия биологическая. – 2014. – №1. –С. 65 - 75.

Швиденко, А.З. Биосферная роль лесов России на старте третьего тысячелетия: углеродный бюджет и Протокол Киото / А.З. Швиденко, Е.А.

Ваганов, С. Нильсон // Сибирский Экологический Журнал. – 2003. – №6. – С. 649 - 658.

Швиденко, А.З. Влияние природных пожаров в России 1998-2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, Е.А. Ваганов, А.И. Сухинин Ш.Ш. Максютков, И. МкКаллум, И.П. Лакида // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 441. – №4. – С. 544 - 548.

Швиденко, А.З. Углеродный бюджет лесов России / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко // Сибирский Лесной Журнал. – 2014. – №1. – С. 69 - 92.

Шибистова, О.Б. Оценка аккумуляции  $\text{CO}_2$  сосновым древостоем методом микровихревых пульсаций / О.Б. Шибистова, Д. Ллойд, О. Колле, А. Арнет, Н.М. Чебакова, Д.А. Золотухин, Г.К. Зражевская, Э.-Д. Шульце // Доклады Академии Наук. – 2002. – Т.383. – №3. – С. 425 - 429.

Air Resources Laboratory. Advancing Atmospheric Science and Technology through Research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arl.noaa.gov/index.php>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017).

Andreae, M.O. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols / M.O. Andreae, O.C. Acevedo, A. Araùjo, P. Artaxo, C.G.G. Barbosa, H.M.J. Barbosa, J. Brito, S. Carbone, X. Chi, B.B.L. Cintra, N.F. da Silva, N.L. Dias, C. Q. Dias-Júnior, F. Ditas, R. Ditz, A.F.L. Godoi, R.H.M. Godoi, M. Heimann, T. Hoffmann, J. Kesselmeier, T. Könemann, M.L. Krüger, J.V. Lavric, A.O. Manzi, A.P. Lopes, D.L. Martins, E.F. Mikhailov, D. Moran-Zuloaga, B.W. Nelson, A.C. Nölscher, D. Santos Nogueira, M.T.F. Piedade, C. Pöhlker, U. Pöschl, C.A. Quesada, L.V. Rizzo, C.-U. Ro, N. Ruckteschler, L.D.A. Sá, M. de Oliveira Sá, C.B. Sales, R.M.N. dos Santos, J. Saturno, J. Schöngart, M. Sörge, C. M. de Souza, R.A.F. de Souza, H. Su, N. Targhetta, J. Tóta, I. Trebs, S. Trumbore, A. van Eijck, D. Walter, Z. Wang, B. Weber, J. Williams, J. Winderlich, F. Wittmann, S. Wolff, and A.M. Yáñez-Serrano // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – Vol. 15. – P. 10723 – 10776.

Arneth, A. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interpersonal and interannual variability of CO<sub>2</sub> fluxes / A. Arneth, J. Kurbatova, O. Kolle, O.B. Shibistova, J. Lloyd, N.N. Vygodskaya, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 514 - 530.

Arneth, A. Water use strategies and ecosystem-atmosphere exchange of CO<sub>2</sub> in two highly seasonal environments / A. Arneth, E.M. Veenendaal, C. Best, W. Timmermans, O. Kolle, L. Montagnani, O. Shibistova // *Biogeosciences*. – 2006. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 421 - 437.

Aubinet, M. Comparing CO<sub>2</sub> storage and advection conditions at night at different carboeuroflux sites / M. Aubinet, P. Berbigier, C.H. Bernhofer, A. Cescatti, C. Feigenwinter, A. Granier, Th. Grünwald, K. Havrankova, B. Heinesch, B. Longdoz, B. Marcolla, L. Montagnani, P. Sedlak // *Boundary Layer Meteorology*. – 2005. – Vol. 116. – Issue 1. – P. 63 - 94.

Bakwin, P.S. Determination of the isotopic (C<sup>13</sup>/C<sup>12</sup>) discrimination by terrestrial biology from a global network of observations / P.S. Bakwin, P.P. Tans, J.W.C. White, and R.J. Andres // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1998. – Issue 12. – P. 555 – 562.

Bakwin, P.S. Measurements of carbon dioxide on a very tall tower / P.S. Bakwin, P.P. Tans, C. Zhao, W. Ussler III, E. Quesnell // *Tellus*. – 1995. – Vol. 47B. – Issue 5. – P. 535 - 549.

Bakwin, P.S. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program / P.S. Bakwin, P.P. Tans, D.F. Hurst, C. Zhao // *Tellus*. – 1998. – Vol. 50. – Issue 5. – P. 401 - 415.

Baldocchi, D.D. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods / Baldocchi D.D., Hincks B.B., Meyers T.P. // *Ecology*. – 1988. – Vol. 69. – Issue 5. – P. 1331 - 1340.

Barichivich, J. Thermal growing season and timing of biospheric carbon uptake across the Northern Hemisphere / J. Barichivich, K.R. Briffa, T.J. Osborn, T.M. Melvin, J. Caesar // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2012. – Vol. 26. – Issue GB4015.

Betts, R.A. El Nino and a record CO<sub>2</sub> rise / R.A. Betts, C.D. Jones, J.R. Knight, R.F. Keeling, J.J. Kennedy // *Nature Climate Change*. – 2016. – Vol.6. – P. 806 - 810.

Bird, M.I. Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia / M.I. Bird, H. Santruckova, A. Arneth, S. Grigoriev, G. Gleixner, Y.N. Kalaschnikov, J. Lloyd, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – P. 631 - 641.

Boden, T.A. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions [Электронный ресурс] / T.A. Boden, G. Marland, and R.J. Andres // Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A/ – Режим доступа: [http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth\\_reg.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html). – (Дата обращения 01.03. 2017).

Carbon Dioxide Information Analysis Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/vostok.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017).

Chen, B. Assessing scalar concentration footprint climatology and land surface impacts on tall-tower CO<sub>2</sub> concentration measurements in the boreal forest of central Saskatchewan, Canada / B. Chen, H. Zhang, C.N. Coops, D. Fu, D.E.J. Worthy, G. Xu, T.A. Black // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2014. – Vol. 18. –Issue 1. – P. 115 - 132.

Chen, B. Interannual variability in the CO<sub>2</sub> rectification over a boreal forest region / B. Chen, J. Chen // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110. –Issue D16301. – Doi: 10.1029/2004JD005546.

Chen, H., Validation of routine continuous airborne CO<sub>2</sub> observations near the Bialystok Tall Tower / H. Chen, J. Winderlich, C. Gerbig, K. Katrynski, A. Jordan, M. Heimann // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2012. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 873 - 889.

Chen, W.J. Effects of climatic variability on the annual carbon sequestration by a boreal aspen forest / W.J. Chen, T.A. Black, P.C. Yang // *Global Change Biology*. – 1999. – Vol. 5. – P. 41 - 53.

Chi, X. Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower to characterize polluted and pristine air in the Siberian taiga / X. Chi, J. Winderlich, J.-C. Mayer, A.V. Panov, M. Heimann, W. Birmili, J. Heintzenberg, Y.

Cheng, and M. O. Andreae // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2013. – Vol. 13. – P. 12271 - 12298.

Ciais, P. Can we reconcile atmospheric estimation of the Northern terrestrial carbon sink with land-based accounting? / P. Ciais, J.G. Canadell, S. Luysaert, F. Chevallier, A. Shvidenko, Z. Poussi, M. Jonas, P. Peylin, Anthony Wayne King, E.-D. Schulze, S. Piao, C. Rodenbeck, W. Peters and F.-M. Breon // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. – 2010. – Vol. 2. – P. 225 - 230.

Ciais, P.C. Carbon and Other Biogeochemical Cycles / P.C. Ciais, Sabine G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton // Stocker, T.F. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. – United Kingdom: Cambridge University Press, 2013, – P. 465-570.

Cleveland, R.B. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess / R.B. Cleveland, W.S. Cleveland, J.E. McRae, I. Terpenning // *Journal of Official Statistics*. – 1990. – Vol. 6. – P. 3 - 33.

Crosson, E.R. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor / E.R. Crosson // *Applied Physics B*. – 2008. – Vol. 92. – P. 403 - 408.

Crutzen, P.J. Trace gas measurements between Moscow and Vladivostok using the Trans-Siberian Railroad / P.J. Crutzen, N.F. Elansky, M. Hahn, G.S. Golitsyn, C.A.M. Brenninkhmejer, D.H. Scharffe, I.B. belicov, M. Maiss, P. Bergamaschi, T. rockmann, A.M. Grisenko and V.M. Sevostyanov // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 1998. – Vol. 29. – P. 179 – 194.

Davis, K.J. The annual cycles of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange over a northern mixed forest as observed from a very tall tower / K.J. Davis, P.S. Bakwin, C.X. Yi, B.W. Berger, C. Zhao, R.M. Teclaw, J.G. Isebrands // *Global Change Biology*. – 2003. – Vol. 9. – Issue 9. – P. 1278 - 1293.

Denning, A.S. Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO<sub>2</sub> in a general circulation model. Part 2: Simulated CO<sub>2</sub> concentrations / A.S. Denning, D.D. Randall, G.J. Collatz, P.J. Sellers // *Tellus*. – 1996. – Vol. 48B. – P. 543 - 567.

Denning, S.A. Latitudinal gradient of atmospheric CO<sub>2</sub> due to seasonal exchange with land biota / A.S. Denning, I.Y. Fung, D. Randall // *Nature*. – 1995. – Vol. 376. – P. 240 - 243.

Dlugokencky, E. Trends in atmospheric carbon dioxide [Web site] / E. Dlugokencky and P. Tans // National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System. – Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. – (Last access: 05 March 2016).

Dolman, A.J. An estimation of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods / A.J. Dolman, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, P. Ciais, N. Tchepakova, T. Chen, M. K. van der Molen, L. Belelli Marchesini, T.C. Maximov, S. Maksyutov, and E.-D. Schulze // *Biogeosciences*. – 2012. – Vol. 9. – P. 5323 - 5340.

Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division NOAA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.esrl.noaa.gov/>. — Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 01.03.2017).

Eneroth, K. Interannual and seasonal variations in transport to a measuring site in western Siberia and their impact on the observed atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratio / K. Eneroth, E. Kjellstrom and K. Kolmen // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108. – Issue D21. – Doi: 10.1029/2002JD002730.

Environment and Climate Change Canada [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ec.gc.ca/mges-ghgm/>. — Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 01.03.2017).

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ecmwf.info/>. — Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 01.03.2017).

Fang, S.X. In situ measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> at the four WMO/GAW stations in China / S.X. Fang, L.X. Zhou, P.P. Tans, P. Ciais, M. Steinbacher, L. Xu,

and T. Luan // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. – Issue 5. – P. 2541 - 2554.

Farquhar, C.D. Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO<sub>2</sub> / C.D. Farquhar, J. Lloyd, J.A. Taylor, L.B. Flangar, J.P. Syvertsen, K.T. Hubic, S.C. Wong, J.R. Eleringer // *Nature*. – 1993. – Vol. 363. – P. 439 - 443.

Feigenwinter, C. Comparison of horizontal and vertical adjective CO<sub>2</sub> fluxes at three forest sites / C. Feigenwinter, C. Bernhofer, U. Eichelmann // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148. – P. 12 - 24.

Flanagan, L.B. Discrimination against C<sup>18</sup>O<sup>16</sup>O during photosynthesis and the oxygen isotope ratio of respired CO<sub>2</sub> in boreal forest ecosystems / L.B. Flanagan, J.R. Brooks, G.T. Varney, J.R. Ehleringer // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1997. – Vol. 11. – №1. – P. 83-98.

Forkel, M. Enhanced seasonal CO<sub>2</sub> exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems / M. Forkel, N. Carvalhais, C. Rödenbeck, R. Keeling, M. Heimann, K. Thonicke, S. Zaehle, M. Reichstein // *Science*. – 2016. – Vol. 351. – Issue 6274. – P. 696 - 699.

Global Warming: A closer look at the numbers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.geocraft.com/WVFossils/greenhouse\\_data.html](http://www.geocraft.com/WVFossils/greenhouse_data.html). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017).

Gloor, M. What is the concentration footprint of a tall tower? / M. Gloor, P. Bakwin, D. Hurst, L. Lock, R. Draxler, P. Tans // *Journal Geophysical Research*. – 2001. – Vol. 106. – P. 17831 - 17840.

Graven, H.D. Enhanced Seasonal Exchange of CO<sub>2</sub> by Northern Ecosystems Since 1960 / H.D. Graven, R.F. Keeling, S.C. Piper, P.K. Patra, B.B. Stephens, S.C. Wofsy, L.R. Welp, C. Sweeney, P.P. Tans, J.J. Kelley, B.C. Daube, E.A. Kort, G.W. Santoni, J. D. Bent // *Science*. – 2013. – Vol. 341. – P. 1085 - 1089.

Guerlet, S. Reduced carbon uptake during the 2010 Northern Hemisphere summer from GOSAT / S. Guerlet, S. Basu, A. Butz, M. Krol, P. Hahne, S. Houweling, O.P. Hasekamp, I. Aben // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – Vol. 40. – Issue 10. – P. 2378 - 2383.



Hartmann, D.L. Observations: Atmosphere and Surface / D.L. Hartmann, A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Bronnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild, P.M. Zhai // Stocker, T.F. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. – United Kingdom: Cambridge University Press, 2013, – P. 159-254.

Haszpra, L. Carbon-dioxide concentration measurements at a rural site in Hungary / L. Haszpra // *Tellus*. – 1995. – Vol. 47B. – P.17 – 22.

Haszpra, L. Climate variability as reflected in a regional atmospheric CO<sub>2</sub> record / L. Haszpra and Z. Barcza // *Tellus*. – 2010. – Vol. 65B. – Issue 5. – P.417 - 426.

Haszpra, L. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation / L. Haszpra, Z. Barcza, K.J. Davis, K. Tarczay // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2005. – Vol. 132. – P. 58 - 77.

Haszpra, L. On the representativeness of carbon dioxide measurement / L. Haszpra // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – Issue D21. – P. 26953 -26960.

Haszpra, L. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe / L. Haszpra, Z. Barcza, D. Hidy, I. Szilagyi, E. Dlugokencky, P. Tans // *Atmospheric Environmental*. – 2008. – Vol. 42. – Issue 38. – P. 8707 – 8716.

Heintzenberg, J. Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009 / J. Heintzenberg, W. Birmili, R. Otto, M. O. Andreae, J.-C. Mayer, X. Chi and A. Panov // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 11. – P.8703 - 8719.

Heintzenberg, J. Mapping the aerosol over Eurasia from the Zotino Tall Tower / J. Heintzenberg, W. Birmili, P. Seifert, A. Panov, X. G. Chi, M.O. Andreae // *Tellus*. – 2013. – Vol. 65B. – P. 11607.

Hernandez-Paniagua, I.Y. Diurnal, seasonal, and annual trends in atmospheric CO<sub>2</sub> at southwest London during 2000-2012: Wind sector analysis and comparison with

Mace Head, Ireland / I.Y. Hernandez-Paniagua, D. Lowry, K.C. Clemitshaw, R.E. Fisher, J.J. France, M. Lanoiselle, M. Ramonet, E.G. Nisbet // *Atmospheric environment*. – 2015. – Vol. 105. – P. 138 - 147.

Higuchi, K. Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO<sub>2</sub> at a boreal forest site in Canada / K. Higuchi, D. Worthy, D. Chan, A. Shashkov // *Tellus*. – 2003. – Vol. 55. – Issue 2. – P. 115 - 125.

Huang, X.X. Temporal characteristics of atmospheric CO<sub>2</sub> in urban Nanjing, China / X.X. Huang, T.J. Wang, R. Talbot, M. Xie, H. Mao, S. Li, B. Zhuang, X. Yang, C. fu, J. Zhu, X. Huang, R. Xu // *Atmospheric Research*. – 2015. – Vol. 153. – P. 437-450.

Inoue, H.Y. Measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> from a meteorological tower in Tsukuba, Japan / H.Y. Inoue and H. Matsueda // *Tellus*. – 2001. – Vol. 53B. – Issue 3. – P. 205 - 219.

Ito, A. Decadal trends in the seasonal-cycle amplitude of terrestrial CO<sub>2</sub> exchange resulting from the ensemble of terrestrial biosphere models / A. Ito, M. Inatomi, D.N. Huntzinger, C. Schwalm, A.M. Michalak, R. Cook, A.W. King, J. Mao, Y. Wei, W.M. Post, W. Wang, M.A. Arain, M. Huang, H. Lei, H. Tian, C. Lu, J. Yang, B. Tao, A. Jain, B. Poulter, S. Peng, P. Ciais, J.B. Fisher, N. Parazoo, K. Schaefer, C. Peng, N. Zeng, F. Zhao // *Tellus*. – 2016. – Vol. 68B. – P. 28968.

Jackson, R.B. Reaching peak emissions / R.B. Jackson, J.G. Candell, C. Le Quere, R.M. Andrew, J.I. Korsbakken, G.P. Peters, N. nakicenovic // *Nature Climate Change*. – 2016. – Vol. 6. – P. 7 -10.

Joos, F. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years / F. Joos and R. Spahni // *PNAS*. – 2008. – Vol. 105. – Issue 5. – P. 1425 - 1430.

Keeling, C.D. A three-dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data / C.D. Keeling, R.B. Bacastow, A.F. Carter, S.C. Piper, T.P. Whorf, M. Heimann, W.G. Mook, H. Roeloffzen / *Aspects of climate Variability in the Pacific and the Western Americas* / D.H. Peterson. – American Geophysical Union, 1989. – P. 165 - 236.

Keeling, C.D. Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole / C.D. Keeling, J.A. Adams Jr, J.R. C.A. Eckdahl Jr., P.P. Guenther // *Tellus*. – Vol. 28. – Issue 6. – P. 552 - 564.

Keeling, C.D. Increased activity of northern hemispheric vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements / C.D. Keeling, J.F.S. Chin, T.P. Whorf // *Nature*. – 1996. – Vol. 382. – P. 146- 149.

Kilikki, J. Atmospheric CO<sub>2</sub> observations at Finnish urban and rural sites / J. Kilikki, T. Aalto, J. Hatakka, H. Portin, T. Laurila // *Boreal Environment Research*. – 2015. – Vol. 20. – Issue 2. – P. 227 - 242.

Kim, J. Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO<sub>2</sub> flux / J. Kim, H.M. Kim, C.-H. Cho, K.-O. Boo, A.R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2017. – Vol. 17. – P. 2881 – 2899.

Konovalov, I.B. Constraining CO<sub>2</sub> emissions from open biomass burning by satellite observations of co-emitted species: a method and its application to wildfires in Siberia / I. B. Konovalov, E.V. Berezin, P. Ciais, G. Broquet, M. Beekmann, J. Hadji-Lazarou, C. Clerbaux, M.O. Andreae, J.W. Kaiser, and E.-D. Schulze // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. –P. 10383 - 10410.

Kozlova, E.A. Seasonal, synoptic, and diurnal-scale variability of biogeochemical trace gases and O<sub>2</sub> from a 300-m tall tower in central Siberia / E.A. Kozlova, A.C. Manning, Y. Kisilyakhov, T. Seifert, M. Heimann // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2008. – Vol. 22. – Issue Gb4020. – Doi:10.1029/2008GB003209.

Langenfelds, R.L. Interannual growth rate variations of atmospheric CO<sub>2</sub> and its  $\delta^{13}\text{C}$ , H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO between 1992 and 1999 linked to biomass burning / R.L. Langenfelds, R.J. Francey, B.C. Pak, L.P. Steele, J. Lloyd, C.M. Trudinger, C.E. Allison // *Global Biogeochemical Cycle*. – 2002. – Vol. 16. – Issue 3. – P. 21-1-21-22.

Le Quere, C. Carbon global budget 2015 / C. Le Quere, R.M. Andrew, J.G. Canadell, S. Sitch, et al. // *Earth System Science Data*. – 2016. – Issue 8. – P. 605 - 649.

Lee, X. Long-term observation of the atmospheric exchange of CO<sub>2</sub> with a temperate deciduous forest in southern Ontario, Canada / X. Lee, J.D. Fuentes, R.M.

Staebler, H.H. Neumann // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – Issue D13. – P. 15.975 - 15.984.

Lin, J.C. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model / J.C. Lin, C. Gerbig, S.C. Wolfsy, A.E. Andrew, B.C. Daube, K.J. Davis, C.A. Grainger // *Journal Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108. – Issue D16. – Doi:10.1029/2002JD003161.

Liu, Y. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions / Y. Liu, S. Goodrick, W. Heimann // *Forest Ecology and Management*. – 2014. – Vol. 317. – P. 80 - 96.

Liu, L.X. Background variations of atmospheric CO<sub>2</sub> and carbon-stable isotopes at Waliguan and Shangdianzi stations in China / L.X. Liu, L.X. Zhou, B. Vaughn, J.B. miller, W.A. Brand, M. Rothe, L. Xia // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2014. – Vol. 119. – Issue 9. – P. 5602 - 5612.

Lloyd, J. A trace-gas climatology above Zotino, Central Siberia / J. Lloyd, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, M. Gloor, N.M. Tchebakova, D. Zolotoukhine, W.A. Brand, R.A. Werner, A. Jordan, C.A. Allison, V. Zrazhewske, O. Shibistova, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. Vol. 54B. – Issue 5. – P. 749 - 767.

Lloyd, J. Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest / J. Lloyd, O. Shibistova, D. Zolotoukhine, O. Kolle, A. Arneth, C. Wirth, J.M. Styles, N.M. Tchebakova, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 590 - 610.

Luus, K.A. The Polar Vegetation Photosynthesis and Respiration Model: a parsimonious, satellite-data-driven model of high-latitude CO<sub>2</sub> exchange / K.A. Luus and J.C. Lin // *Geoscientific Model Development*. –2015. – Vol. 8. – P.2655–2674.

Luyssaert, S. Old-growth forests as global carbon sinks / S. Luyssaert, E.D. Schulze, A. Borner, A. Knohl, D. Hessenmoller, B. E. Law, P. Ciais, and J. Grace // *Nature*. –2008. – Vol. 455. – P. 213 – 215.

Machida, T. Vertical and meridional distributions of the atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratio between northern midlatitudes and southern subtropics / T. Machida, K. Kita, Y.

Kondo, D. Blake, S. Kawakami, G. Inoue // *Geophysical Research Letters*. – 2003. – Vol. 108. – Issue D3. – P. 8401.

Machida, T. Atmospheric greenhouse gases over Siberia / T. Machida, M. Sasakawa, M. Arshinov, B. Brian, S. Mitin, A. Galanin, T. Maximov // *Climate and Permafrost Ecosystems: Proceedings of IXth international Symposium “C/H<sub>2</sub>O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with spesiam emphasis on Eastern Eurasia”*. – Yakutsk: IBPC SB RAS, 2016. – P. 149 - 152.

Mukhortova, L. Soil contribution to carbon budget of Russian forests / L. Mukhortova, D. Schepaschenko, A. Shvidenko, I. Mc Callum, F. Kraxner // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2015. – Vol. 20. – P. 97 - 108.

Murayama, S. Influence of atmospheric transport on the inter-annual variation of the CO<sub>2</sub> seasonal cycle downward zero-crossing / S. Murayama, K. Higuchi, S. Taguchi // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Vol. 34. – Issue L04811.

Myhre, G. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing / G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang // *Stocker, T.F. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. – United Kingdom: Cambridge University Press, 2013, – P. 659-740.

Myhre, G. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases / G. Myhre, E.J. Highwood, K.P. Shine, and F. Stordal // *Geophysical Research Letter*. – 1998. – Vol. 25. – Issue 14. – P. 2715 – 2718.

Nakazawa, T. Two curve fitting methods applied to CO<sub>2</sub> flask data / T. Nakazawa, M. Ishizawa, K. Higuchi, N.B.A. Trivett // *Environmetrics*. – 1997. – Vol. 8. – P. 197 - 218.

Nakazawa, T. Two curve fitting methods applied to CO<sub>2</sub> flask data / T. Nakazawa, M. Ishizawa, K. Higuchi, N.B.A. Trivett // *Environmetrics*. – 1997. – Vol. 8. – P. 197 - 218.

Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming / S. Piao, P. Ciais, P. Friedlingstein, P. Peylin, M. Reichstein, S. Luyssaert, H. Margolis, J. Fang, A. Barr, A. Chen, A. Grelle, D.Y. Hollinger, T. Laurila, A. Lindroth, A.D. Richardson and T. Vesala // *Nature*. – 2008. – Vol. 451. – P. 49 - 53.

Niinisto, S.M. Seasonality in boreal forest ecosystem affects the use of soil temperature and moisture as predictors of soil CO<sub>2</sub> efflux / S.M. Niinisto, S. Kellomaki, J. Silvola // *Biogeosciences*. – 2011. – Vol. 8. – P. 3169 - 3186.

Nilsson, S. Full carbon account for Russia: Interim Report IR-00–021 / S. Nilsson, A. Shvidenko, V. Stolbovoi, M. Gluck, M. Jonas, and M. Obersteiner. – Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2000. – 193 p.

NOAA. National Center for Environmental Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datasets>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.03.2017).

Pan, Y. A large and Persistent carbon sink in the World's forest / Y. Pan, R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.I. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Poao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes // *Science*. – 2011. – Vol. 333. – P. 988 - 993.

Paris, J.-D. Source-receptor relationships for airborne measurements of CO<sub>2</sub>, CO and O<sub>3</sub> above Siberia: A cluster-based approach / J.-D. Paris, A. Stohl, P. Ciais, P. Nedelec, B. D. Belan, M. Y. Arshinov, and M. Ramonet // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2010. – Vol. 10. – P. 1671 – 1687.

Paris, J.-D. The YAK-AEROSIB transcontinental aircraft campaigns: New insights on the transport of CO<sub>2</sub>, CO and O<sub>3</sub> across Siberia / J.-D. Paris, P. Ciais, P. Nedelec, M. Ramonet, B.D. belan, M.Yu. Arshinov, G.S. Golitsyn, I. Granberg, A. Stohl, G. Cayez, G. Athier, F. Boumard and J.M. Cousin // *Tellus*. – 2008. – Vol. 60B. – P. 551 – 568.

Peregon, A. An image-based inventory of the spatial structure of west Siberian wetlands / A. Peregon, S. Maksyutov, Y. Yamagata // *Environmental Research Letters*. – 2009. – Vol. 4. – Doi:10.1088/1748-9326/4/4/045014v.

Peters, G.P. Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008–2009 global financial crisis / G.P. Peters, G. Marland, C. Le Quere, T. Boden, J.G. Canadell, M.R. Raupach // *Nature Climate Change*. – 2012. – Vol. 2. – P. 2 - 4.

Petit, J.R. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Benders, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delayque, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard // *Nature*. – 1999. – Vol. 399. – P. 429 - 436.

Pickers, P.A. Investigating bias in the application of curve fitting programs to atmospheric time series / P.A. Pickers and A.C. Manning // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2015. – Vol. 7. – P. 7085 - 7136.

Popa, M.E. Measurements of greenhouse gases and related tracer at Bialystok tall tower station in Poland / M.E. Popa, M. Gloor, A.C. Manning, A. Jordan, U. Schultz, F. Haensel, T. Seifert, and M. Heimann // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2010. – Vol. 3. – P. 407 - 427.

Quegan, S. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models / S. Qiegan, C. Beer, A. Shvidenko, J. Mccallum, I.C. Handoh, P. Peylin, C. Rodenbeck, W. Lucht, S. Nilsson and C. Schmullius // *Global Change Biology*. – 2011. – Vol. 17. – P. 351 - 365.

Ramonet, M. Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300m north-west of Moscow / M. Ramonet, P. Ciais, I. Nepomniachii, K. Sidorov, R.E.M. Neubert, U. Langendorfer, D. Picard, V. Kazan, S. Biraud, M. Gusti, O. Kolle, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 713 - 634.

Randerson, J. The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide / J. Randerson, M.V. Thompson, T.J. Conway, I.Y. Fung, C.B. Field // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1997. – Vol. 11. – Vol. 4. – P. 535 - 560.

Roser, C. Net CO<sub>2</sub> exchange rates in three different successional stages of the “Dark Taiga” of central Siberia / Roser C., L. Montagnani, E.-D. Schulze, D. Mollicone, O. Kolle, M. Meroni, D. Papale, L. Belelli Marchesini, S. Federici, R. Valentini // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 642 - 654.

Saeki, T. Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO<sub>2</sub> measurements / T. Saeki, S. Maksyutov, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, P. Tans, T. J. Conway, M. Saito, V. Valsala, T. Oda, R. J. Andres, and D. Belikov // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118. – P. 1100 - 1122.

Sasakawa, M. Aircraft and tower measurements of CO<sub>2</sub> concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 / M. Sasakawa, T. Machida, N. Tsuda, M. Arshinov, D. Davydov, A. Fofonov, O. Krasnov // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. – 2013. – Vol.118. – Issue 16. – P. 9489 - 9498.

Schepaschenko, D. A new hybrid land cover dataset for Russia: A methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information / D. Schepaschenko, I. McCallum, A. Shvidenko, S. Fritz, F. Kraxner, and M. Obersteiner // *Journal of Land Use Science*. – 2011. – Issue 6. – P.245 – 259.

Schmidt, M. High-precision quasi-continuous atmospheric greenhouse gas measurements at Trainou tower (Orleans forest, France) / M. Schmidt, M. Lopez, C.Y. Kwok, C. Messenger, M. Ramonet, B. Wastine, C. Vuillemin, F. Truong, B. Gal, E. Parmentier, O. Cloue, P. Ciais // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2014. – Vol. 7. – Issue 7. – P. 2283 - 2296.

Schmidt, M. High-precision quasi-continuous atmospheric greenhouse gas measurements at Trainou tower (Orleans forest, France) / M. Schmidt, M. Lopez, C.Y. Kwok, C. Messenger, M. Ramonet, B. Wastine, C. Vuillemin, F. Truong, B. Gal, E. Parmentier, O. Cloué, P. Ciais // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2014. – Vol. 7. – P. 2283 - 2296.

Schneising, C. Terrestrial carbon sink observed from space: variation of growth rates and seasonal cycle amplitudes in response to interannual surface temperature



variability / O. Schneising, M. Reuter, M. Buchwitz, J. Heymann, H. Bovensmann, and J. P. Burrow // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol.14. – Issue 1. – P. 133 -141.

Schulze, E.D. Productivity of forest in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbon sink – a synthesis / E.D. Schulze, J. Lloyd, M. Kelliher, C. Wirth, C. Rebmann, B. Luhker, M. Mund, A. Khohl, I.L.M. Milykova, W. Schulze, W. Ziegler, A.B. Varlagin, A.F. Sogachev, R. Valentini, S. Dore, S. Grigoiev, O. Kolle, M.I. Panfyorov, N. Tchebakova, N.N. Vygodskaya // *Global Change Biology*. – 1999. – Vol. 5. – P. 703 - 722.

Schulze, E.-D. The Eurosiberian Transect: an introduction to the experimental / E.-D. Schulze, N.N. Vygodskaya, N.M. Tchebakova, C.I. Czimczik, D.N. Kozlov, J. Lloyd, d. Mollicone, E. Parfenova, K. n. Sidorov, A.V. Varlagin, C. Wirth // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 421 - 428.

Schuur, E.A.G. Climate change and the permafrost carbon feedback / E.A.G. Schuur, A.D. McGuire, C. Schadel, G. Grosse, J.W. Harden, D.J. Hayes, G. Hugelius, C.D. Koven, P. Kuhry, D.M. Lawrence, S.M. Natali, D. Olefeldt, V.E. Romanovsky, K. Schaefer, M.R. Turetsky, C.C. Treat and J.E. Vonk // *Nature*. – 2015. – Vol. 520. – P. 171 - 179.

Shibistova, O. Annual ecosystem respiration budget for a *Pinus sylvestris* stand in central Siberia / O. Shibistova, J. Lloyd, G. Zrazhevskaya, A. Arneth, O. Kolle, A. Khohl, N. Astrakhantceva, I. Shijneva, J. Schmerler // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 588 - 589.

Shibistova, O. Seasonal and spatial variability in soil CO<sub>2</sub> efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest / O. Shibistova, J. Lloyd, S. Evgrafova, N. Savushkina, G. Zrazhevskaya, A. Arneth, A. Knohl, O. Kolle, E.-D. Schulze // *Tellus*. – 2002. – Vol. 54B. – Issue 5. – P. 552 - 567.

Shvidenko A. Changing world, boreal forest and IBFRA / A. Shvidenko // *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions: Proceedings of the international conference*. – Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS, 2011. – P. 8 - 12.

Silvola, J. CO<sub>2</sub> fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions / J. Silvola, J. Alm, U. Ahlholm, H. Nykanen, P.J. Martikainen // British Ecological Society. – 1996. – Vol. 84. – Issue 2. – P. 219 - 228.

Sonnentag, O. On the relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes in a minerotrophic fen / O. Sonnentag, G. Van Der Kamp, A.G. Barr, J.M. Chen // Global Change Biology. – 2010. – Vol.16. – Issue 6. – P.1762 - 1776.

Stephens, B.B. Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO<sub>2</sub> / B.B. Stephens, K.R. Gurney, P.P. Tans, C. Sweeney, W. Peters, L.M. Bruhwiler, P. Ciais, M. Ramonet, P. Bousquet, T. Nakazawa, S. Aoki, T. Machida, G. Inoue, N. Vinnichenko, J. Lloyd, A. Jordan, M. Heimann, O.B. Shibistova, R.L. Langenfelds, L.P. Steele, R.J. Francey and A.S. Denning // Science. – 2007. – Vol. 316. – P. 1732 – 1735.

Stjernberg A.-C.E. Low concentrations of near-surface ozone in Siberia / A.-C.E. Stjernberg, A. Skorokhod, J.D. Paris, N. Elansky, P. Nedelec, A. Stohl // Tellus. – 2012. – Vol. 64B. – P.11607.

Syed, K.H. Environmental control of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a treed, moderately rich fen in northern Alberta / K.H. Syed, L.B. Flanagan, P.J. Carlson, A.J. Glenn, K.E. Van Gaalen // Agricultural and Forest Meteorology. – 2006. – Vol. 140. – Issue 1 - 4. – P.97 -114.

Tarnocai, C. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region / C. Tarnocai, J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, and S. Zimov // Global Biogeochemical Cycles. – 2009. – Vol. 23. – P. GB2023.

Taylor, J.A. Sources and sinks of atmospheric CO<sub>2</sub> / J.A. Taylor and J. Lloyd // Australian Journal of Botany. – 1992. – Vol. 40. – Issue 5 – P. 407 - 418.

Thompson, R.L. In-situ measurements of oxygen, carbon monoxide and greenhouse gases from Ochsenkopf Tall Tower in Germany / R.L. Thompson, A.S. Manning, E. Gloor, U. Schultz, T. Seifert, F. Hänsel, A. Jordan, and M. Heimann // Atmospheric Measurement Techniques. – 2009. – Vol. 2. – P. 573 - 591.

Thoning, K.W. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974-1985 / K.W. Thoning, P.P. Tans, W.D.

Komhyr // Journal of Geophysical Research. – 1989. – Vol.94. – Issue D6. – P. 8549 - 8565.

Timokhina, A. Assessing of concentration footprint climatology at Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in the boreal forest of Central Siberia // A. Timokhina, A. Prokushkin, M. Korets, C. Gerbig, M. Heimann // SGEM2016: Conference Proceedings of 16 International multidisciplinary scientific geoconference SGEM2016. – Bulgaria, 2016. – P. 487 - 494.

Tohjima, Y. First measurements of the latitudinal atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> distributions across the western Pacific / Y. Tohjima, H. Mukai, T. Machida, Y. Nojiri, M. Gloor // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32. – Issue 17. – L17805.

Umezawa, T. Contributions of natural and antropogenicf sources to atmospheric methane variations over western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes / T. Umezawa, T. Machida, S. Aoki, T. Nakazawa // Global Biogeochemical Cycles. – 2012. – Vol. 26. – Gb4009.

Van der Laan, S. Atmospheric CO<sub>2</sub>, d(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>), APO and oxidative ratios from aircraft flask samples over Fyodorovskoye, Western Russia / S. van der Laan, I.T. van der Laan-Luijkx, C.R. Rodenbeck, A. Varlagin, I. Shironya, R.E.M. Neubert, M. Ramonet, H.A.J. Meijer // Atmospheric Environment. – 2014. – Vol. 97. – P. 174 – 181.

Van der Laan-Luijkx, I.T. Atmospheric CO<sub>2</sub>, δ(O<sup>2</sup>/N<sup>2</sup>) and δ<sup>13</sup>CO<sup>2</sup> measurements at Jungfraujoch, Switzerland: results from a flask sampling intercomparison program / I.T. van der Laan-Luijkx, S. van der Laan, C. Uglietti, M.F. Schibig, R.E.M. Neubert, H.A.J. Meijer, W.A. Brand, A. Jordan, J.M. Richter, M. Rothe, M.C. Leuenberger // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. – 2012. – Vol.6. – Issue 7. – P. 7293 - 7322.

Vasileva, A.V. Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia / A.V. Vasileva, K.B. Moiseenko, J.-C. Mayer, N. Jurgens, A. Panov, M. Heimann, M.O. Andreae // Journal of Geophysical Research. – 2011. – Vol. 116. – P. D07301.

Vermeulen, A.T. Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992-2010) / A.T. Vermeulen, A. Hensen, E.A. Popp, W. C. M. van den Bulk, P. A. C. Jongejan // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2011. – Vol. 4. – P. 617 - 644.

Vermeulen, A.T. Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992-2010) / A.T. Vermeulen, A. Hensen, E.A. Popp, W.C.M. van den Bulk, P.A.C. Jongejan // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2011. – Issue 4. – P. 617 - 644.

Viers, J. Seasonal and spatial variability of elemental concentrations in boreal forest larch foliage of Central Siberia on continuous permafrost / J. Viers, A.S. Prokushkin, O.S. Pokrovsky, Y. Auda, A.V. Kirilyanov, E. Beaulieu, C. Zouiten, P. Oliva, B. Dupre // *Biogeochemistry*. – 2013. – Vol. 113. – P. 435 – 449.

Watai, T. Development of an atmospheric carbon dioxide standard gas saving system and its application to a measurement at a site in the west Siberian forest / T. Watai, T. Machida, K. Shimoyama, M. Yamamoto, G. Inoue // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2010. – Vol. 27. – P. 843 - 855.

Wenzel, S. Projected land photosynthesis constrained by changes in the seasonal cycle of atmospheric CO<sub>2</sub> / S. Wenzel, P.M. Cox, V. Eyring, P. Friedlingstein // *Nature*. – 2016. – Vol. 538. – P. 499 - 501.

Winderlich, J. Continuous low-maintenance CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia / J. Winderlich, H. Chen, C. Gerbig, T. Seifert, O. Kolle, J.V. Lavrič, C. Kaiser, A. Höfer, and M. Heimann // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2010. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 1113 - 1128.

Winderlich, J. Inferences from CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes / J. Winderlich, C. Gerbig, O. Kolle and M. Heimann // *Biogeosciences*. – 2014. – Vol. 11. – P. 2055 - 2068.

Winderlich, J. Setup of a CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurement system in Central Siberia and modeling of its results, technical reports 26 / J. Winderlich. – Hamburg, 2012. – 120 p.

Wingate, L., Strong seasonal disequilibrium measured between the oxygen isotope signals of the leaf and soil CO<sub>2</sub> exchange / L. Wingate, J. Ogee, R. Burlett, A. Bosc // *Global Change Biology*. – 2010. – Vol. 16. – Issue 11. – P. 3048-3064.

World Data Centre for Greenhouse Gases [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/cgi-bin/wdcgg/catalogue.cgi>. — Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 01.03.2017).

Yi, C. Influence of advection on measurements of the net ecosystem-atmosphere exchange of CO<sub>2</sub> from a very tall tower / C. Yi, K.J. Davis, P.S. Bakwin, B.W. Berger, L.C. Marr // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – Issue D8. – P. 9991 - 9999.

Zeng, N. Agricultural Green Revolution as a driver of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal amplitude / N. Zeng, F. Zhao, G.J. Collatz, E. Kalnay, R.J. Salawitch, T.O. West, L. Guanter // *Nature*. – 2014. – Vol.515. – Issue 7527. – P.394 – 397.

Zhang, F. Implications for CO<sub>2</sub> emissions and sinks changes in western China during 1995-2008 from atmospheric CO<sub>2</sub> at Waliguan / F. Zhang and L.X. Zhou // *Tellus*. – 2013. – Vol. 65B. – DOI: 10.3402/tellusb.v65i0.19576.

Zhang, L.J. Comparison analysis of the global carbon dioxide concentration column derived from SCIAMACHY, AIRS, and GOSAT with surface station measurements / L.J. Zhang, H. Jiang, X.Y. Zhang // *International Journal of Remote Sensing*. – 2015. – Vol.36. – Issue 5. – P. 1406 - 1423.

Zhu, Z. Greening of the Earth and its drivers / Z. Zaichun, S. Piao, R.B. Myneni, M. Huang, Z. Zeng, J.G. Canadell, P. Ciais, S. Sitch, P. Friedlingstein, A. Arneth, C. Cao, L. Cheng, E. Kato, C. Koven, Y. Li, X. Lian, Y. Liu, R. Liu, J. Mao, Y. Pan, S. Peng, J. Penuelas, B. Poulter, T. A.M. Pugh, B. D. Stocker // *Nature Climate Change*. — 2016. — Vol. 6. — P.791 - 795.

ZOTTO project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.zottoproject.org/>— Заглавие с экрана. — (Дата обращения: 01.03.2017).