



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование возможностей использования моделей при
проведении климатического мониторинга в Российской Арктике»

Исполнитель Кочеткова Елизавета Дмитриевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 6 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Теоретические основы.	6
1.1. Роль арктического региона в глобальной климатической системе	6
1.2 Основные парниковые газы. Механизмы образования и накопления в атмосфере.....	8
1.2.1. Диоксид углерода.....	9
1.2.2. Метан.....	10
1.2.3. Приземный озон	11
Глава 2. Методология исследования. Особенности получения и первичной обработки данных.	14
2.1. Стационары ААНИИ.....	14
2.2 Измерительные приборы	18
АРОА-370.....	18
3.02П-А ОПТЭК	19
Picarro G2301	21
Особенности калибровки Picarro	22
2.3. Сопутствующие данные.....	23
Метаданные	23
Данные о калибровках и событиях.....	24
2.4. Первичная обработка данных.....	25
2.5. Статистические характеристики и описание рядов наблюдений	27
2.5.1. Ледовая база мыс Баранова.....	28
2.5.2. Тикси	37

2.6. Разработка и развертывание базы данных	45
2.7. Инфраструктура и мониторинг	51
Глава 3. Модельные и натурные данные. Сравнительный анализ.	53
3.1. Данные спутниковых наблюдений	53
3.1.1. Применение спутниковых данных для климатического мониторинга.....	54
3.2. Численное моделирование.....	56
3.2.1. Реанализ ECMWF	57
3.3. Сравнительный анализ.....	59
3.3.1. Ледовая база Мыс Баранова.....	59
3.3.2. Тикси	63
Заключение	69
Список литературы и источников	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Сокращенная схема базы данных концентраций парниковых газов на стационарах ААНИИ	76
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Расшифровка флагов качества данных	78

Введение

Изучение концентраций парниковых газов (ПГ) в атмосфере играет ключевую роль в понимании современных климатических изменений. Долговременные наблюдения за концентрациями CO_2 , CH_4 и O_3 (углекислый газ, метан, озон) позволяют не только оценивать динамику изменения состава атмосферы, выявлять сезонные и межгодовые колебания, но и анализировать региональные особенности распределения парниковых газов, а также количественно оценивать вклад деятельности человека в изменение газового состава атмосферы.

В последние десятилетия наблюдается рост концентраций парниковых газов, что обусловлено как природными процессами, так и антропогенными факторами, включая сжигание ископаемого топлива, изменения в землепользовании и выбросы от промышленных предприятий. Для объективного мониторинга атмосферных концентраций ПГ в Арктическом регионе необходимы надежные источники данных, охватывающие как измеренные значения, так и данные численного моделирования.

Цель работы: исследовать возможность использования данных реанализа основных климатически активных газов (углекислого газа и метана) при проведении климатического мониторинга в Российской Арктике.

Для выполнения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Произвести сбор и систематизацию данных приземных концентраций углекислого газа, метана и озона, получаемых со станций Лаборатории экспериментальной климатологии Арктики Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ЛЭКА ААНИИ)
2. Изучить принципы производства измерений, условий эксплуатации приборов и разработать программы первичной обработки сырых данных.

3. Получить статистические характеристики и составить описания доступных рядов наблюдений.
4. Разработать структуру базы данных для хранения результатов наблюдений и сопутствующих данных, определить необходимую инфраструктуру и развернуть приложение на сервере ААНИИ.
5. Исследовать доступные модели реанализа, получить статистические характеристики ряды приземных концентраций ПГ для точек, соответствующих положению станций Ледовая База Мыс Баранова и Тикси.
6. Провести сравнительный анализ данных реанализа и натурных данных приземных наблюдений.
7. Сделать выводы о возможности использования данных реанализа в целях проведения климатического мониторинга и восстановления пропусков в рядах наблюдений.

1. Теоретические основы

1.1. Роль арктического региона в глобальной климатической системе

Арктика играет ключевую роль в глобальной климатической системе, являясь одним из главных индикаторов изменений климата. Усиление парникового эффекта приводит к более быстрому росту температур в Арктике по сравнению с другими регионами мира — это явление известно как "арктическое усиление" (Arctic amplification). По данным IPCC (2021), средняя температура в Арктике увеличивается в 2–4 раза быстрее, чем в среднем по планете [1].

Основные факторы, обуславливающие значимость Арктики для глобального климата, включают:

1. Высокую чувствительность ледового покрова к изменениям температуры. В свою очередь, таяние морского льда снижает альбедо, что усиливает поглощение солнечной энергии океаном и способствует дальнейшему потеплению [2].
2. Влияние арктических процессов на циркуляцию атмосферы и океана, включая формирование глобальных течений и погодных систем [3].
3. Высокие концентрации парниковых газов, таких как метан, выделяемого из вечной мерзлоты при её оттаивании [4].

Эти процессы делают Арктику важным объектом исследований для понимания глобальных изменений климата.

Кроме того, арктический регион является важным регулятором теплового баланса планеты, выступая в роли «холодильника» Земли. Сезонные колебания ледового покрова и взаимодействие атмосферы с поверхностью океана существенно влияют на энергетический обмен между высокими и низкими широтами. Нарушения в этом балансе могут отражаться

на погодных условиях далеко за пределами Арктики, в том числе в умеренных широтах Северного полушария [5].

Также стоит отметить роль Арктики в глобальном углеродном цикле. Таяние вечной мерзлоты высвобождает не только углекислый газ, но и метан — парниковый газ с гораздо более высоким потенциалом к удержанию тепла в атмосфере. По оценкам, арктические районы содержат до 50% мировых запасов органического углерода, заключённого в мерзлоте [6].

Учитывая вышеуказанные особенности, становится очевидным, что климатический мониторинг в Арктике является необходимым условием для своевременного выявления глобальных климатических трендов и прогнозирования дальнейших изменений климата на планете.

Цель климатического мониторинга в Арктике заключается в обеспечении комплексной и долговременной оценки состояния климатической системы в регионе. Это включает отслеживание изменений температуры воздуха и поверхности, толщины и площади морского льда, состояния снежного покрова, концентраций парниковых газов и других ключевых параметров.

Основные задачи мониторинга включают:

1. Сбор достоверных и репрезентативных данных о климатических параметрах;
2. Выявление долгосрочных трендов и межгодовой изменчивости климата;
3. Оценка влияния климатических изменений на арктические экосистемы и криосферу;
4. Моделирование и прогноз изменений климата;
5. Поддержка решений в области адаптации и смягчения последствий климатических изменений на международном уровне.

Для эффективного мониторинга используются как традиционные методы наблюдений с метеорологических станций, так и современные технологии, включая спутниковые наблюдения, автоматизированные буи, дроны, и данные реанализа.

1.2 Основные парниковые газы. Механизмы образования и накопления в атмосфере

Парниковые газы (ПГ) — это газы, способные поглощать и излучать инфракрасное излучение, тем самым удерживая тепло в атмосфере и вызывая эффект, известный как парниковый. Основные антропогенные и природные ПГ включают:

1. Диоксид углерода (CO_2) — образуется в результате сжигания ископаемого топлива, лесных пожаров, дыхания живых организмов. Его вклад в антропогенный парниковый эффект оценивается как доминирующий.
2. Метан (CH_4) — образуется при анаэробном разложении органических веществ (болота, сельское хозяйство, таяние мерзлоты). По потенциалу воздействия на климат метан в 28–34 раза активнее CO_2 за 100-летний период [1].
3. Закись азота (N_2O) — выделяется в результате деятельности микроорганизмов в почвах и при применении азотных удобрений. Обладает парниковым потенциалом в ~265 раз выше CO_2 .
4. Фторированные газы (HFC, PFC, SF_6) — синтетические газы, применяемые в промышленности. Их вклад менее значителен по концентрации, но крайне высок по парниковому потенциалу.

В контексте настоящей работы под парниковыми газами будут подразумеваться диоксид углерода и метан. Остальные ПГ подробно не рассматриваются ввиду их сравнительно меньшего влияния на региональные климатические процессы и ограниченности наблюдательных данных.

Парниковые газы различаются по времени жизни в атмосфере: от нескольких лет (CH_4) до сотен и тысяч лет (CO_2 , SF_6), что определяет как краткосрочные, так и долгосрочные последствия их накопления.

1.2.1 Диоксид углерода

CO₂ образуется в результате сжигания ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ), лесных и торфяных пожаров, дыхания живых организмов, а также процессов разложения органического вещества. Значительный вклад в эмиссию вносит антропогенная деятельность, включая изменение землепользования, особенно вырубку лесов [7]. По данным Глобального углеродного бюджета (Global Carbon Budget) [8], на долю сжигания ископаемого топлива приходится более 85% всех антропогенных выбросов CO₂, тогда как на изменение землепользования — около 10% [9].

Удаление CO₂ из атмосферы происходит за счёт фотосинтеза и океанического стока:

1. Фотосинтез — основной механизм удаления CO₂ из атмосферы: зелёные растения поглощают его и превращают в органическое вещество. Это временный «сток», так как после отмирания растений углерод может вновь возвращаться в атмосферу [10].
2. Океанический сток — океаны поглощают около 25% ежегодных антропогенных выбросов CO₂ благодаря химическим процессам (образование угольной кислоты и последующее осаждение в виде карбонатов), а также за счёт биологической активности.

Несмотря на наличие естественных механизмов компенсации, накопление углекислого газа продолжается, ежегодно примерно 45% выбросов CO₂ остаются в атмосфере [1], вызывая устойчивый рост его концентрации: с доиндустриального уровня ~280 ppm до более чем 419 ppm по состоянию на 2023 год [11].

CO₂ отличается длительным временем жизни в атмосфере. Согласно различным оценкам, значительная доля выброшенного сегодня углекислого газа будет сохраняться в атмосфере на протяжении сотен лет, а часть — до тысяч лет [12]. Это делает его климатически значимым не только в краткосрочной, но и в геологически долгосрочной перспективе, что требует комплексной климатической политики по его сокращению.

1.2.2 Метан

CH_4 — второй по значимости парниковый газ после углекислого газа с точки зрения антропогенного вклада в изменение климата. Хотя его концентрация в атмосфере значительно ниже, чем у CO_2 , метан обладает гораздо более высоким потенциалом глобального потепления (GWP): за 20 лет он в 84–86 раз, а за 100 лет — примерно в 28–34 раза более эффективен в удержании тепла [1].

Метан образуется в результате как естественных, так и антропогенных процессов. Основные источники включают:

1. Естественные источники:
 - a. анаэробное разложение органического вещества в болотах, торфяниках и других водно-болотных угодьях;
 - b. термогенное образование в геологических структурах и вулканическая активность;
 - c. деятельность термитов и гидратные залежи в морских осадках [13]
2. Антропогенные источники доминируют в современном метановом бюджете (~60% всех эмиссий) и включают:
 - a. сельское хозяйство, особенно животноводство (ферментация в желудках жвачных животных, навозохранилища);
 - b. рисоводство, при котором насыщенные водой почвы создают анаэробные условия для метаногенеза;
 - c. добычу, транспортировку и сжигание ископаемого топлива (нефть, уголь, природный газ), сопровождающиеся утечками метана на всех этапах;
 - d. свалки и другие источники органических отходов .
 - e. горение сланцев, что особенно актуально для российских регионов, таких как ЯНАО.

По данным Глобального бюджета метана (Global Methane Budget), основные секторы эмиссии CH_4 включают сельское хозяйство (~40%), ископаемое топливо (~35%) и отходы (~20%) [13].

В отличие от CO_2 , метан имеет сравнительно короткий срок жизни в атмосфере — около 9–12 лет [1]. Его удаление происходит в основном за счёт:

1. химической реакции с гидроксил-радикалами (ОН) в тропосфере, приводящей к его окислению до CO_2 и воды [14];
2. небольшой части, удаляемой в стратосфере и поглощаемой в почвах.

Хотя срок жизни метана сравнительно короткий, его мощное парниковое действие делает его значимым газом в краткосрочной климатической политике. Быстрое сокращение выбросов CH_4 может оказать значительный охлаждающий эффект уже в ближайшие десятилетия [15].

С начала индустриальной эпохи концентрация метана в атмосфере возросла более чем в два с половиной раза — с ~720 ppb (частей на миллиард) до более чем 1940 ppb по состоянию на 2023 год [16]. Темпы роста CH_4 в последние годы вызывают особую обеспокоенность: в 2020 и 2021 годах были зафиксированы рекордные уровни увеличения [17]. По оценке UNEP [18], снижение глобальных выбросов метана на 45% к 2030 году может предотвратить до $0,3^\circ\text{C}$ потепления к середине века.

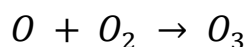
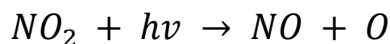
Накопление метана оказывает не только парниковый эффект, но и влияет на качество воздуха, поскольку его окисление влияет на концентрацию озона в тропосфере — ещё одного парникового и вредного для здоровья газа [19].

1.2.3 Приземный озон

Одним из ключевых побочных продуктов окисления метана в атмосфере является приземный (тропосферный) озон. Хотя образование озона не является стоком метана в строгом физико-химическом смысле, оно сопровождает процессы его разрушения и оказывает существенное влияние на климатическую систему.

Метан, вступая в реакцию с гидроксильными радикалами (ОН) в присутствии солнечного света, инициирует серию химических превращений, в результате которых образуются промежуточные органические радикалы (например, CH_3O_2), а также диоксид азота, который под действием

ультрафиолета распадается с образованием атомарного кислорода, способного реагировать с молекулярным кислородом с образованием озона:



Таким образом, вклад метана в образование приземного озона осуществляется через его участие в фотохимическом смоге, особенно в присутствии оксидов азота (NO_x), часто образующихся при сжигании топлива [20].

Приземный озон — вторичный загрязнитель, не выбрасываемый напрямую в атмосферу, но формирующийся в результате химических реакций между метаном, летучими органическими соединениями, оксидами азота и солнечным излучением. Его концентрация существенно варьируется в зависимости от сезона, времени суток, фоновых условий и уровня загрязнения воздуха.

С точки зрения климатического влияния озон также классифицируется как короткоживущий климатический форсинг. Он обладает способностью к поглощению инфракрасного излучения и тем самым усиливает парниковый эффект. По оценке [19], глобальное снижение концентрации метана на 20% может привести к сокращению приземного озона на 8–10 ppb, особенно в регионах с низким уровнем NO_x , таких как океаны или удалённые континентальные районы.

Кроме климатического эффекта, приземный озон оказывает отрицательное воздействие на здоровье человека и продуктивность растений. Он способен вызывать воспаления дыхательных путей, снижать функции лёгких и увеличивать смертность от респираторных заболеваний. У растений озон нарушает процессы фотосинтеза и может существенно снижать урожайность сельскохозяйственных культур [21].

Таким образом, контроль выбросов метана имеет двойной эффект: с одной стороны, он уменьшает прямой парниковый потенциал метана, с другой

— снижает уровни приземного озона, что дополнительно смягчает последствия климатических изменений и улучшает качество воздуха.

2. Методология исследования. Особенности получения и первичной обработки данных

В этой главе приведены краткие сведения о станциях ААНИИ, где производятся наблюдения за приземной концентрацией CO_2 , CH_4 и O_3 , рассмотрены устройство измерительных приборов и некоторые особенности их обслуживания, оказывающие влияние на процесс обработки данных или детали предоставления информации пользователю; методики и последовательность первичной обработки данных; метаданные, требуемые для обработки или предоставления данных.

2.1 Стационары ААНИИ

В ведении Лаборатории экспериментальной климатологии Арктики находятся:

1. Научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова»
2. Гидрометеорологическая обсерватории Тикси
3. Российский научный центр на архипелаге Шпицберген
4. НЭС «Северный Полюс»

Каждая из приведенных станций представляет интерес для этой работы – во всех четырех производятся круглогодичные наблюдения за концентрацией парниковых газов. Для этого используется схожий приборный парк, он будет рассмотрен позже в подглаве 2.2, сейчас же будут приведены краткие сведения о положении и особенностях самих обсерваторий.

Научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова» – крупнейшая российская гидрометеорологическая полярная обсерватория. Располагается недалеко от мыса Баранова на острове

Большевик, архипелаг Северная земля. Карта архипелага и основные сведения о стационаре приведены на рис. 2.1 и в таблице 2.1



Рис 2.1 Карта архипелага Северная земля

Таблица.2.1 Основные сведения о НИС «Ледовая база Мыс Баранова»

Дата основания	22.04.1987
Часовой пояс	UTC+8
Полярный день	22 апреля – 22 августа
Полярная ночь	22 октября – 22 февраля
Координаты	N 79°17' E 101°37'
Синоптический индекс	20094
Средняя температура воздуха летом	+0.8 °C

Сегодня в научно-исследовательском стационаре ведутся круглогодичные комплексные исследования в областях метеорологии, аэрологии, океанологии, исследования ледовых явлений, проводятся озонметрические наблюдения, наблюдения за концентрацией диоксида углерода и метана и др. Станция передает данные газового состава атмосферы с 2014 года.

Гидрометеорологическая обсерватории (ГМО) Тикси – комплексная исследовательская обсерватория, расположенная в одном из наиболее важных регионов Российской Арктики. Станция расположена на побережье моря Лаптевых, залив Сого, бухта Тикси, более подробные сведения указаны в таблице 2.2.

Таблица.2.2. Основные сведения о ГМО Тикси

Дата основания	12.08.1932
Координаты	N 71°3' E 128°5'
Часовой пояс	UTC+9
Синоптический индекс	21824
Полярный день	10 мая – 3 августа
Полярная ночь	19 ноября – 24 января
Средняя температура воздуха летом	+6°C
Средняя температура воздуха зимой	-29.8°C

Здесь проводятся исследования по метеорологии, аэрологии, актинометрии, наблюдения за ионосферой и магнитосферой и исследования вечной мерзлоты. Она входит в систему наблюдений Росгидромета за атмосферной концентрацией основных долгоживущих парниковых газов (ПГ). Мониторинг ПГ осуществляется в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) для станций, осуществляющих работу по программе «Глобальная служба атмосферы» (ГСА).

В ГМО Тикси с 2010 года и по настоящее время производятся наблюдения за концентрацией углекислого газа и метана, наблюдения за озоном начали вестись позднее, эта тема будет подробнее рассмотрен в работе в дальнейших главах.

Российский научный центр на архипелаге Шпицберген (РНЦХ) является объединением научно-исследовательских организаций. Здесь производятся круглогодичные наблюдения и экспедиционные работы. Научно-экспедиционная станция расположена в пос. Баренцбург. Наиболее

важными объектами РНЦШ являются центр спутникового мониторинга и химико-аналитическая лаборатория РАЭ-Ш, в пос. Баренцбург располагаются две станции мониторинга состояния приземного воздуха. Наблюдения за парниковыми газами ведутся с 2015 года.



Рис 2.3 Карта архипелага Шпицберген.

Таблица.2.3. Основные сведения о РНЦШ

Дата основания	28.06.2016
Часовой пояс	UTC+1
Полярный день	20 апреля – 22 июля
Полярная ночь	28 октября – 14 февраля
Координаты	N 78°03` E 14°13`
Средняя температура воздуха летом	+4.3 °C
Средняя температура зимой	-11.8 °C

Научно-экспедиционное судно «Северный полюс» (Далее ЛСП) – ключевое звено пространственно-распределённой обсерватории, дополняющее данные прибрежных станций гидрометеорологической информацией из Центральной Арктики. Пожалуй, наиболее интересная

обсерватория списка, по понятным причинам, не имеющая постоянных координат. Ее первый научный рейс начался только в 2022 году, измерение концентраций ПГ производилось в период всей экспедиции. Краткие сведения представлены в таблице 2.4.

Таблица.2.4. Тактико-технические характеристики НЭС «Северный полюс»

Длина платформы	83,1 м
Ширина	22,5 м
Осадка	8,6 м
Водоизмещение	10 000 т
Мощность головного двигателя	4 200 кВт
Скорость	10 узлов
Экипаж	14 человек
Научный персонал	34 человека
Класс ледового судна	М Arc5 [1] AUT1-C HELIDECK-F Special purpose ship

2.2 Измерительные приборы

Приборный парк, предназначенный для производства наблюдений за концентрацией парниковых газов представлен двумя газоанализаторами для измерения концентрации озона: 3.02П-А фирмы ОПТЭК и АРОА-370 производства Horiba, и газоанализатором Picarro моделей G2301 и G2401 на разных станциях.

АРОА-370

Данный газоанализатор предназначен для непрерывного измерения концентрации озона в приземном слое атмосферы. Здесь используется метод абсорбции ультрафиолетового излучения (NDUV), для большей точности также применяются методы перекрестной модуляции потоков, и

сравнительных вычислений. Значения концентрации выводятся в двух вариантах: комбинация мгновенного и текущего среднего значения или мгновенного и среднего значения, в зависимости от пользовательских настроек. Получение данных возможно через интерфейс прибора или при помощи выходного порта RS-232C [22].

К сожалению, использование данных этого прибора в текущий момент невозможно ни для одной из станций, из-за некорректных калибровок и общей неисправности приборов от 50 до 75% данных не валидны: значения концентраций отрицательны, журнал калибровок частично отсутствует, и восстановить значения нельзя.

3.02П-А ОПТЭК

Газоанализатор используется для непрерывного фоновоего мониторинга концентрации озона в атмосферном воздухе. Принцип действия основывается на эффекте гетерогенной хемилюминесценции, возникающей в результате реакции озона с окисляемыми химическими веществами газовой смеси. Прибор измеряет интенсивность свечения газов, пропорциональную концентрации O_3 ; далее происходит преобразование сигнала в цифровой и запись значений на накопитель и их вывод на экран монитора. Поступление газовой пробы обеспечивается при помощи встроенного микронасоса. Конструкция газоанализатора и принцип измерений не требуют поддержания и определенных диапазонов значений температуры и давления в реакторе, соответственно не требуется и мониторинг этих параметров. Однако присутствует ограничение по предельному содержанию неизмеряемых компонентов в газовой смеси, обусловленное конструкцией скруббера [17]:

1. Cl_2 не более 1,0 мг/м³
2. H_2S не более 0,5 мг/м³
3. CO не более 50,0 мг/м³
4. NO_2 не более 0,5 мг/м³
5. SO_2 не более 0,5 мг/м³
6. атмосферная пыль не более 5 мг/м³

Данные значения не превышают фоновую концентрацию, поэтому не требуют дополнительного мониторинга. Условия эксплуатации приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Условия эксплуатации 3.02П-А ОПТЭК

Температура	+10...+35 °С
Давление	630 – 800 мм рт. ст. (839,9 – 1066,6 гПа)
Влажность	До 98% влаги без конденсации
Объемный расход	1,8 ± 0,2 л

Примеры выходных файлов прибора представлены на рисунках 2.4 и 2.5

```

30.12.21 04:15:22  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:00:13
30.12.21 04:15:52  0.062 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:00:43
30.12.21 04:16:22  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:01:13
30.12.21 04:16:52  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:01:43
30.12.21 04:17:22  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:02:13
30.12.21 04:18:52  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:03:43
30.12.21 04:19:22  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:04:13
30.12.21 04:19:52  0.063 мг/м3 (20С)  16% 3К  0:04:43

```

Рис. 2.4 Пример выходных файлов 3.02П-А; структура до декабря 2021 г.

```

23.01.24 11:16:14  0.032      52%      7:55:18
23.01.24 11:16:44  0.034      52%      7:55:48
23.01.24 11:17:14  0.033      52%      7:56:18
23.01.24 11:17:44  0.034      52%      7:56:48
23.01.24 11:18:14  0.033      52%      7:57:18
23.01.24 11:18:44  0.034      52%      7:57:48
23.01.24 11:20:14  0.033      52%      7:59:18
23.01.24 11:20:44  0.033      52%      7:59:48

```

Рис. 2.5 Пример выходных файлов 3.02П-А; структура после января 2024 г.

Измерения производятся в автоматическом режиме с дискретностью 30 с. Далее в работе под данными концентраций приземного озона подразумеваются именно измерения 3.02П-А ОПТЭК.

Picarro G2301

Значительных отличий в принципах производства измерений, выходных данных и особенностях обслуживания между моделями 2301 и 2401 нет, для описания прибора выбрана модель G2301 поскольку автор участвовала в работах по ремонту и обслуживанию этого прибора в ГМО Тикси в 2023 г.

Анализатор концентрации парниковых газов Picarro G2301 позволяет одновременно измерять концентрации CO_2 и CH_4 с чувствительностью доля на миллиард (ppb) и пренебрежимо малым отклонением в период до нескольких месяцев. Прибор соответствует требованиям ВМО и других международных организаций, таких как Объединенная система наблюдений за выбросами углерода (ICOS), предъявляемым к станциям мониторинга атмосферы.

Принцип действия анализатора основан на методе WS-CRDS (Wavelength Scanned Ring Down Spectroscopy), известном в русскоязычной литературе как «спектроскопия поглощения света в многопоточных неаксиальных кюветах при сканировании по длинам волн». Суть этого типа спектроскопии заключается в поглощении энергии ИК-лазера малыми молекулами при характеристичных длинах волн.

Калибровка прибора осуществляется автоматически путем измерения образца из баллона с калибровочным газом, параметры которого заранее известны.

В ГМО Тикси каждые 50 часов автоматически измеряется образец из одного из трех баллонов с калибровочным газом, подготовленным в центральной калибровочной лаборатории ВМО ГСА в NOAA ESRL, г. Боулдер, штат Колорадо В 2017 году развернут набор, подготовленный и откалиброванный в FMI (Финский метеорологический институт) [24]. Также существуют плановые калибровки, проводимые раз в месяц метеорологом наблюдателем, технология такой калибровки будет описана дальше. Аналогичные работы производятся во всех обсерваториях ЛЭКА.

Особенности калибровки Picarro

Поскольку зависимость показаний прибора от концентрации исследуемого газа чрезвычайно линейна, рекомендуется использовать три калибровочных газа: два характеризуют калибровочную прямую, третий используется для верификации (в обсерваториях ЛЭКА используются 4 калибровочных газа). При этом сами концентрации эталонов не имеют особого значения, если их совокупность охватывает репрезентативный диапазон значений, т.е. значений, при которых обычно работает анализатор. Чтобы вручную провести калибровку прибора наблюдателю необходимо произвести измерения калибровочных газов и построить график на ось у которого будут нанесены величины калибровочного стандарта, а на ось x – измеренные величины (рис. 2.6).

	Value given by analyzer	Value of calibration standard
Calibration point #1	200.1	202.7
Calibration point #2	600.3	597.6
Calibration point #3	400.0	400.0

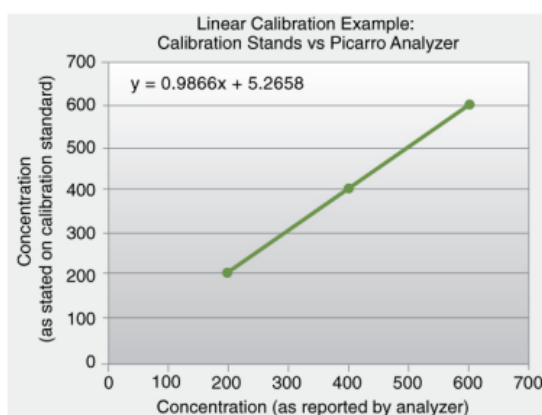


Рис.2.6 Иллюстрация процесса пользовательской калибровки Picarro G2401

Полученные значения углового коэффициента и точки пересечения графика с осью x вводятся в программное обеспечение через функцию

«Пользовательская калибровка». Также возможен возврат к заводской калибровке (ввод значений 1 и 0 соответственно) [25].

На станциях ЛЭКА используется вариант калибровки, когда наблюдатель последовательно подключает четыре калибровочных газа и на протяжении 5 минут производит измерения. Полученные значения записываются в журнал калибровок, позже по ним рассчитываются калибровочные коэффициенты, используемые при первичной обработке данных.

2.3. Сопутствующие данные

Метаданные

Для корректного проведения исследований и составления отчетности необходимо иметь не только данные измерений, но и метаданные, т.е. информацию о приборах, с помощью которых проводились эти измерения, сроки производства наблюдений, причины, по которым данные могут быть невалидны, а также информацию о смене и обслуживании приборов, коды ошибок и т.д.

Данные журналов калибровок, происшествий и операции на станциях логично хранить в схеме, соответствующей конкретной станции. В то же время информацию о приборах, их кодах ошибок, метаданных и сопутствующих методиках обработки рядов измерений целесообразно вынести в отдельную схему, поскольку эти данные:

- а. Одинаковы для всех станций
- б. Слабо изменяются со временем
- с. Логически разделимы с непосредственно данными измерений

В рамках данной работы собраны, систематизированы и стандартизированы следующие данные:

- а. Модели, серийные номера, производители измерительных приборов

- b. Рабочие диапазоны приборов
- c. Коды ошибок и предупреждений
- d. Данные о станциях, включая географическое положение (за исключением ЛСП), даты открытия и закрытия станции (указывается также при переносе станции), даты консервации и описания

Данные о калибровках и событиях

Данные о событиях относятся к конкретной станции или единственному прибору. К числу событий, влияющих на проведение наблюдений за концентрацией парниковых газов на интересующих станциях, относятся:

- a. Любые возгорания: пожар на станции и вблизи, плановые сжигания мусора, возгорание проводки, задымления и пр.
- b. Неподходящие метеорологические условия
- c. Неподходящее состояние помещения, например нарушение условий эксплуатации по температуре или влажности воздуха
- d. Плановый и срочный ремонт прибора, вывод из эксплуатации, консервация и пр.
- e. Проведение работ по обслуживанию
- f. Другие ситуации, неучтенные заранее и изначально не классифицированные

Большая часть дополнительных данных необходима для Picarro, обладающего регламентом регулярных калибровок, занимающих значительные интервалы времени, и строгими требованиями к скоростям ветра – не менее 5 м/с; также для этого прибора требуются сведения о калибровочных баллонах.

2.4. Первичная обработка данных

Сырые данные Picarro поступают файлами с расширением «.dat». В одном файле содержится 24 часа измерений, однако начало и, соответственно, окончания файлов могут не совпадать с началом суток.

Структура данных следующая:

DATE, TIME, FRAC_DAYS_SINCE_JAN1, FRAC_HRS_SINCE_JAN1, JULIAN_DAYS, EPOCH_TIME, ALARM_STATUS, INST_STATUS, CavityPressure, CavityTemp, DasTemp, EtalonTemp, WarmBoxTemp, MPVPosition, OutletValve, CO_sync, CO2_sync, CO2_dry_sync, CH4_sync, CH4_dry_sync, H2O_sync

Приведем расшифровку наиболее важных колонок в таблице 2.6 и методику получения значений, используемых для целей мониторинга.

*Таблица 2.6. Расшифровка основных составляющих файлов измерений Picarro.
Выдержка из официальной технической документации прибора*

<i>Колонка</i>	<i>Единицы измерений</i>	<i>Пояснение</i>
DATE	/	Дата измерения
TIME	/	Время измерения
ALARM_STATUS	/	Предупреждение о состоянии прибора. 0 – нормальное состояние, 1 и 65536 – предупреждение
CavityPressure	Тор	Давление в газовой кювете (~140 Тор)
CavityTemp	°C	Температура в газовой кювете (~45 °C)

WarmBoxTemp	°C	Температура в боксе
CO2_dry_sync	ppm	Эквивалентная концентрация углекислого газа в сухом воздухе
CH4_dry_sync	ppm	Эквивалентная концентрация метана в сухом воздухе

Концентрации измеряются в частицах на миллион для углекислого газа и частицах на миллиард для метана в реальном, то есть влажном, воздухе. Прибор использует встроенный алгоритм для преобразования фактически измеренных концентраций в эквивалентные значения в сухом воздухе. Сухая концентрация может быть рассчитана на основе фактического влагосодержания с использованием квадратичной полиномиальной аппроксимации [26]:

$$(CO_2)_{dry} = (CO_2)_{wet} / (1 + aH_{rep} + bH_{rep}^2)$$

$$(CH_4)_{dry} = (CH_4)_{wet} / (1 + cH_{rep} + dH_{rep}^2)$$

Здесь H_{rep} – переданная прибором концентрация водяного пара в воздухе; a, b, c, d – вычисленные экспериментально константы.

В цикл первичной обработки данных Picasso входит чистка по статусу состояния прибора, наблюдаемым параметрам температуры и давления в кювете и температуре бокса. При этом некорректные значения не отбрасываются, вместо этого производится разметка данных с помощью флагов, их значения едины для всех получаемых данных и поэтому приведены в приложении 2.

Очистка данных по фактическим значениям осуществляется только по полю ALARM_STATUS – отмечаются все записи, где статус отличен от 0. После значения усредняются до минутных и производится фильтрация по температуре и давлению. Граничные значения приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Допустимые диапазоны значений, наблюдаемых при производстве измерений Picarro

CavityPressure	140 ± 0.02
CavityTemp	45 ± 0.005
WarmBoxTemp	

Примеры выходных файлов ОПТЭК были приведены в главе 1.3. Этот прибор не передает конкретную информацию о собственном состоянии, но здесь содержатся данные о температуре и влажности воздуха, которые характеризуют соответствие условий эксплуатации. В процессе первичной обработки в соответствии с ограничениями на эксплуатацию составляются файлы ошибок, к ним помимо записей, где значения выходят за пределы допустимых диапазонов также относятся записи, где данные о состоянии отсутствуют.

В процессе обработки помимо файлов измерений собираются файлы предупреждений вида «дата-время – статус предупреждения», только для Picarro, и ошибок: «дата-время – идентификатор ошибки – значение величины, вызвавшей ошибку», для Picarro и ОПТЭК.

После минутные значения усредняются до часовых и суточных. Удаление физически невозможных и сомнительных величин не производится в целях дальнейшего исследования причин появления выбросов.

2.5. Статистические характеристики и описание рядов наблюдений

Для последующего анализа наблюдательных данных и их сравнения с результатами реанализа необходимо предварительно охарактеризовать основные свойства исходных рядов. В данном разделе представлены статистические характеристики метеорологических рядов, полученных на

трех станциях: Ледовая станция «Северный полюс» (ЛСП), мыс Баранова и Тикси.

Для каждого ряда рассчитаны базовые статистики, включая среднее значение, медиану, стандартное отклонение, дисперсию, минимум, максимум, а также 50-й, 95-й и 99-й процентиля. Помимо общей характеристики всего периода наблюдений, вычислены показатели для каждого календарного года отдельно, что позволяет оценить межгодовую изменчивость.

Анализ процентилей, особенно высоких (95-й и 99-й), позволяет выявить экстремальные события в ряду, что имеет важное значение при сравнении наблюдений с реанализами.

Дополнительно рассмотрены сезонные особенности вариаций рядов и оценено количество пропущенных данных. Результаты анализа представлены для каждой станции отдельно.

2.5.1. Ледовая база мыс Баранова

Для рядов наблюдений были рассчитаны основные статистические характеристики: среднее, среднеквадратическое отклонение, минимальное, максимальное, прирост средних в процентах к предыдущему году, количество пропусков (таблица 2.8), а также квантили: 1-й, 5-й, 50-й, 95-й, 99-й.

Таблица 2.8. Основные статистические характеристики ряда среднесуточных концентраций CO₂ на мысе Баранова

год	mean	std	min	max	missing
2015	406,82	3,51	400,33	413,68	0
2016	405,51	6,34	390,62	418,70	2
2017	408,56	7,05	392,84	421,46	6
2018	410,50	6,69	390,16	424,79	7
2019	412,93	6,91	392,63	423,25	8
2020	415,26	7,00	397,23	427,67	3
2021	Измерения не проводились				365
2022	414,58	6,91	403,18	428,12	234
2023	419,22	6,56	401,54	429,99	0
2024	427,79	1,96	423,61	433,35	11
год	q01	q05	q50	q95	q99
2015	400,73	401,43	406,39	412,81	413,59
2016	391,85	392,73	407,92	412,72	416,32
2017	393,85	394,96	410,98	416,47	419,45
2018	395,81	397,45	413,60	417,57	422,15
2019	394,98	398,95	416,27	420,24	421,59
2020	399,19	401,69	418,37	423,02	425,32
2021	Измерения не проводились				
2022	403,36	403,90	415,67	423,87	424,72
2023	404,93	406,52	421,80	426,90	428,36
2024	423,68	425,11	427,48	430,89	432,62

Следует отметить необычное поведение нижних квантилей в 2024 году в сравнении со всем предыдущим периодом, однако это легко объясняется неполнотой доступного ряда данных: только до конца апреля, соответственно годовая статистика необъективна из-за отсутствия летнего минимума.

Далее на рисунке 2.7 приведены визуализации среднесуточных значений: оригинальный ряд с линией тренда, ряд с удаленным линейным трендом, а также их боксплоты и гистограмма распределения.

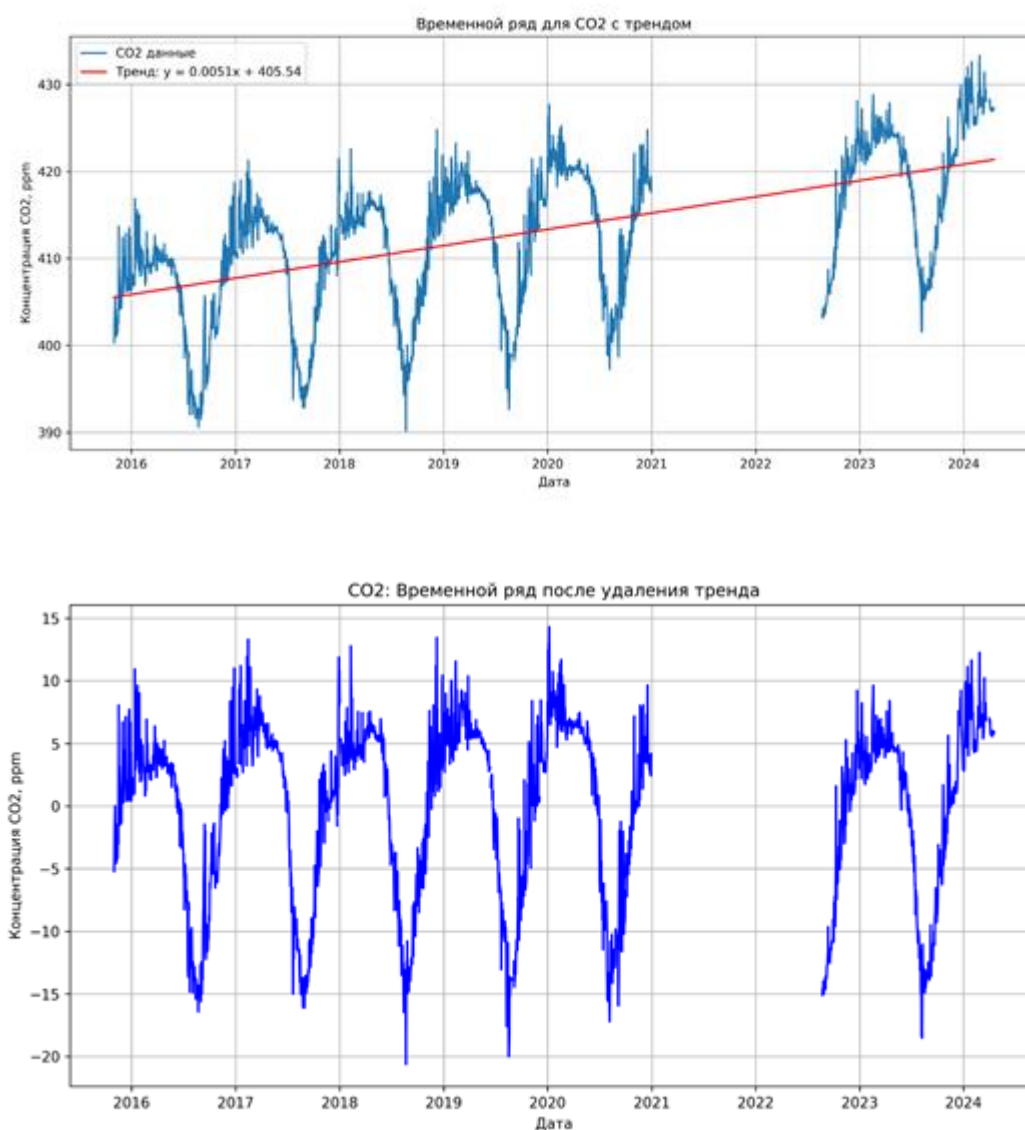


Рис.2.7 Исходный ряд среднесуточных концентраций углекислого газа с линией тренда и детрендрованный ряд

Данные о концентрациях углекислого газа на базе «Мыс Баранова» показывают ярко выраженную сезонную динамику с максимумами в зимний период (декабрь-январь) и минимумами летом (август-сентябрь). Такая сезонность наблюдается на протяжении всего периода измерений, начиная с 2015 года и продолжается до 2024 года. Это соответствует общим тенденциям для северных широт [2], где в зимний период снижается фотосинтетическая активность растений, а летом она усиливается, что приводит к снижению концентраций CO₂.

В среднем, максимальные значения CO_2 увеличиваются быстрее, чем минимальные, что может свидетельствовать о нарастании антропогенных выбросов. Также наблюдается общий тренд на повышение концентраций углекислого газа, что соответствует глобальному росту уровней CO_2 в атмосфере [5], однако выраженная тенденция изменения СКО отсутствует. Несмотря на сезонные колебания, вариабельность данных не увеличивается, что может свидетельствовать о стабилизации изменений в приземных концентрациях углекислого газа.

Углекислый газ рос стабильно на 0.5%–0.7% в год. После 2022 года темп роста ускорился: в 2023 прирост +1.12%, а в 2024 — уже +2.05%, однако последние значения учитывать не следует из-за неполноты ряда.

Общая статистика за весь период:

Среднее значение: 412.64

Стандартное отклонение: 8.45

Дисперсия: 71.46

Коэффициент вариации: 0.02

Минимум: 390.16

Максимум: 433.35

Асимметрия: -0.28

Эксцесс: -0.45

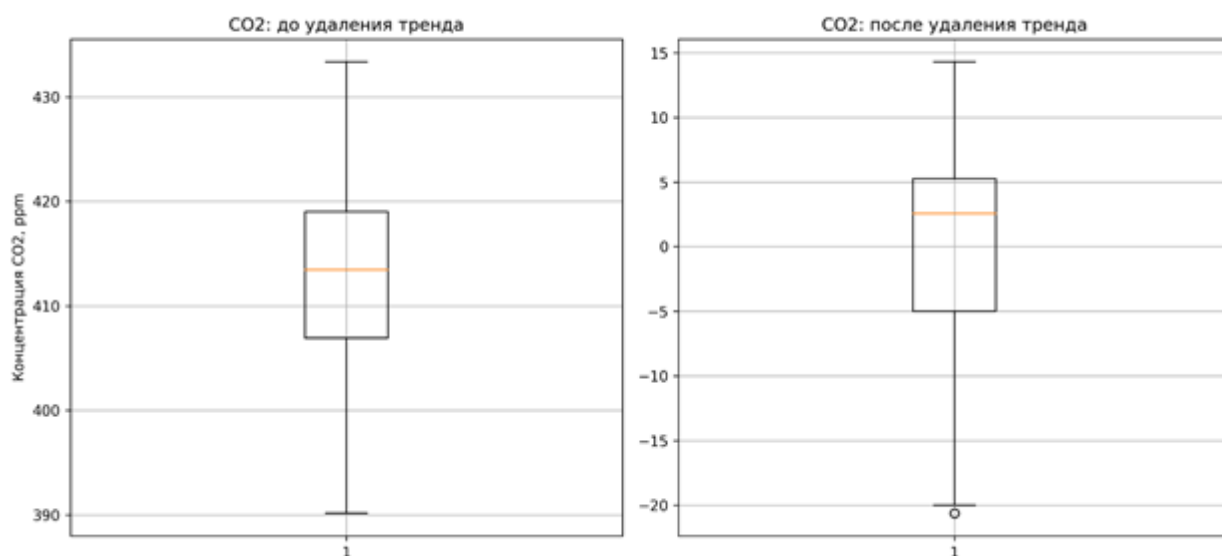


Рис.2.8. Боксплот исходного ряда среднесуточных концентраций углекислого газа и детрендированного ряда.

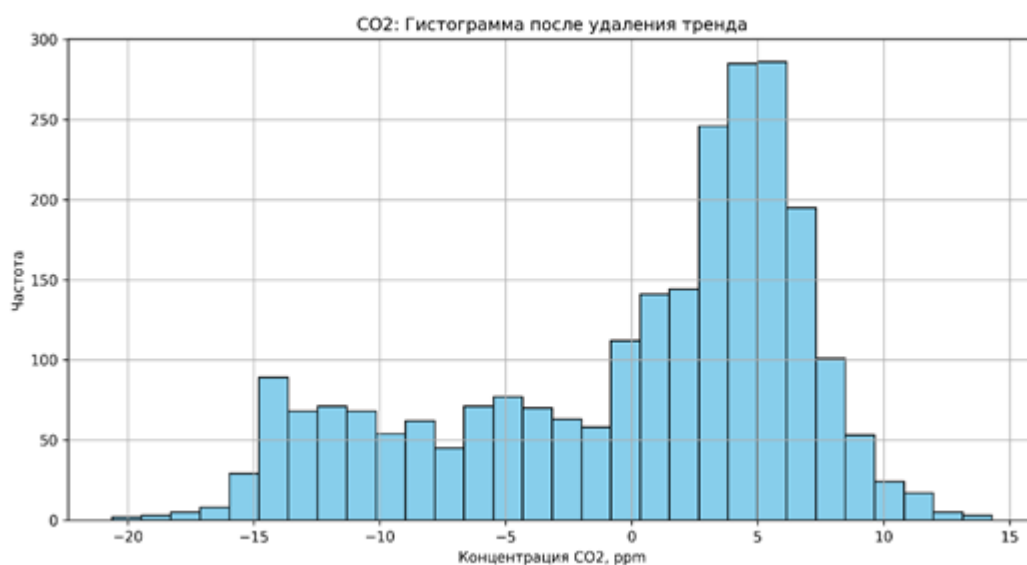


Рис.2.9. Гистограмма распределения детрендированного ряда.

Гистограмма имеет три основных пика:

1. Левый пик (около -15 ppm): Указывает на отдельную группу значений с отрицательными отклонениями.

2. Центральный пик (около -5 ppm): Основная масса данных сосредоточена в этом диапазоне, что ожидаемо после удаления тренда. Отрицательные пики характеризуют распределение в теплый период года.
3. Правый пик (около +5 ppm): Указывает на дополнительную группу положительных отклонений.

Такое распределение обосновано сезонными колебаниями, наибольшие концентрации углекислого газа приходятся на период отсутствия вегетации и в особенности на зимние месяцы. Смещение в сторону наиболее высоких значений объясняется северным положением станции, соответственно непродолжительным летом, в течении которого происходит усиление стока CO₂.

Аналогичная работа проделана для ряда метана.

Таблица 2.9. Основные статистические характеристики ряда
среднесуточных концентраций CH_4

год	mean	std	min	max	missing
2015	1,954	0,030	1,920	2,076	0
2016	1,939	0,028	1,892	2,060	2
2017	1,946	0,030	1,899	2,144	5
2018	1,952	0,025	1,904	2,085	2
2019	1,964	0,028	1,916	2,067	5
2020	1,981	0,029	1,934	2,116	0
2021	Измерения не проводились				365
2022	2,012	0,021	1,976	2,093	234
2023	2,016	0,023	1,974	2,107	0
2024	2,048	0,021	2,020	2,130	11

год	q01	q05	q50	q95	q99
2015	1,922	1,927	1,946	2,019	2,048
2016	1,897	1,903	1,935	1,989	2,036
2017	1,901	1,906	1,943	1,998	2,046
2018	1,906	1,914	1,949	1,992	2,038
2019	1,918	1,923	1,961	2,014	2,043
2020	1,937	1,941	1,979	2,036	2,061
2021	Измерения не проводились				
2022	1,976	1,983	2,012	2,047	2,072
2023	1,979	1,983	2,015	2,064	2,090
2024	2,021	2,026	2,043	2,083	2,108

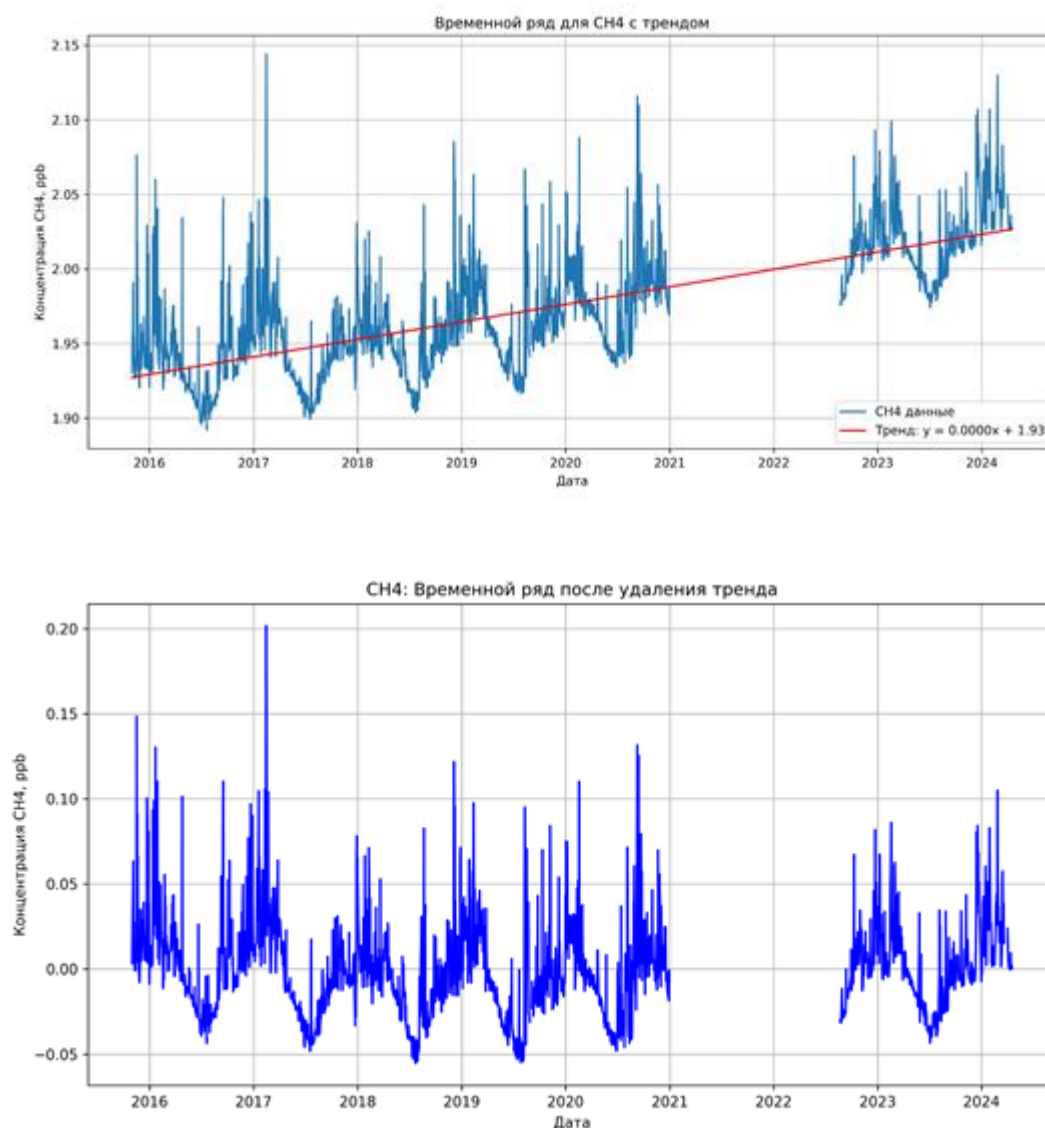


Рис.2.10. Исходный ряд среднесуточных концентраций метана с линией тренда и детрендрованный ряд.

В целом, в отличие от ряда значений углекислого газа, ряд метана не очень хорошо аппроксимируется линейным трендом, однако ряд наблюдений невелик и для упрощения модели его будет достаточно.

Интересно отметить, что основной приток метана происходит в летние месяцы, когда повышается биологическая активность в болотистых и влажных зонах, происходит протаивание почв, таяние вечной мерзлоты; однако максимальные концентрации наблюдаются в зимние месяцы, это связано с

прекращением (мы говорим о полярных регионах) фотохимических процессов, разрушающих метан, а также атмосферными инверсиями, препятствующими вертикальному перемешиванию [6]. В холодный период года также увеличиваются среднеквадратические отклонения, что опять же связано с синоптическими условиями, инверсиями и накоплением газа в приземном слое.

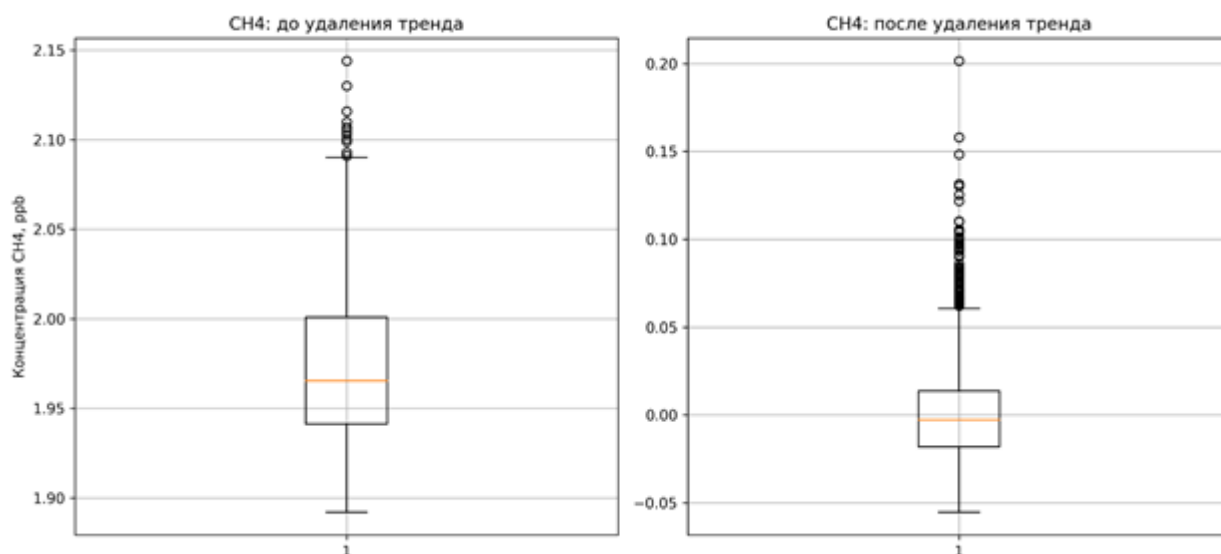


Рис.2.11 Боксплот исходного ряда среднесуточных концентраций метана и детрендированного ряда.

В годовом распределении метана ярко выражен правый хвост, ряд имеет большое количество положительных выбросов. Отсутствует ярко выраженное изменение в годовом распределении величин, рост значений происходит равномерно.

Общая статистика за весь период:

Среднее значение: 1.97

Стандартное отклонение: 0.04

Дисперсия: 0.00

Коэффициент вариации: 0.02

Минимум: 1.89

Максимум: 2.14

Асимметрия: 0.55

Экссесс: -0.12

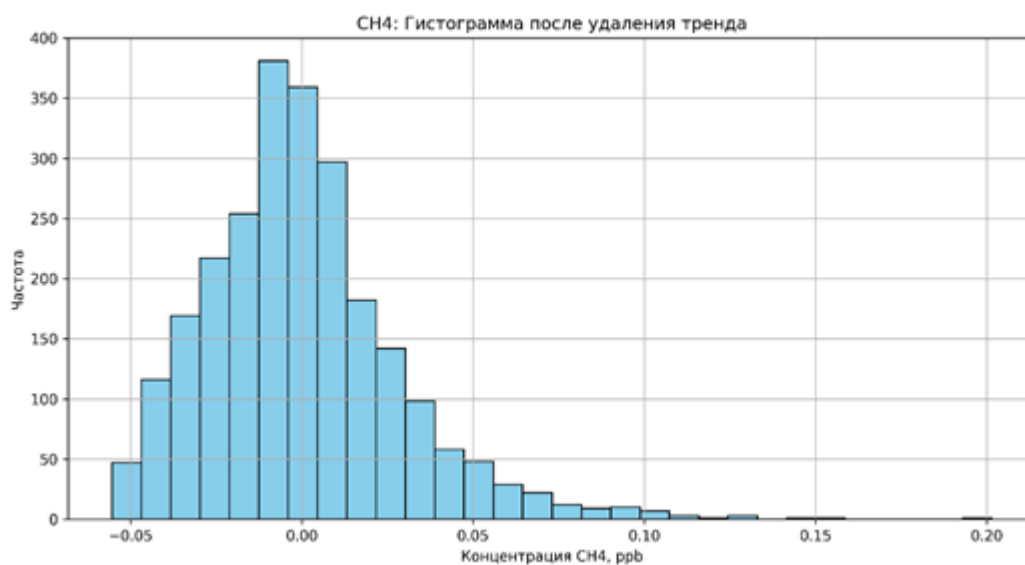


Рис.12. Гистограмма распределения детрендированного ряда

В целом, метан растет постепенно, около 0.3%–0.9% в год. Однако увеличения темпов роста в настоящий момент не происходит, прирост 2022-2023 гг. значительно меньше.

2.5.2 Тикси

Доступный ряд наблюдений обсерватории Тикси несколько короче – только до 2022 г. В нем присутствует значительно большее количество пропусков, что связано со сложностями в обслуживании приборов на станции.

*Таблица 2.10. Основные статистические характеристики ряда
среднесуточных концентраций CO₂*

год	mean	std	min	max	Рост, %	missing
2013	393,83	4,76	386,46	403,38		61
2014	401,15	6,49	386,67	411,18	1,86	66
2015	403,94	6,81	387,08	413,69	0,69	9
2016	406,83	6,19	390,96	417,41	0,72	25
2017	413,91	2,61	406,47	420,18	1,74	149
2018	410,73	7,06	395,88	420,18	-0,77	89
2019	413,50	7,16	397,95	427,02	0,67	76
2020	416,38	7,47	397,00	428,76	0,70	65
2021	421,65	3,58	411,85	427,82	1,27	269
2022	426,83	1,72	423,98	432,32	1,23	32

год	q01	q05	q50	q95	q99
2013	386,91	387,71	392,73	401,64	402,80
2014	387,35	388,97	403,79	408,27	410,38
2015	388,56	390,37	407,22	411,29	413,24
2016	392,24	393,47	409,37	413,92	415,63
2017	408,26	409,46	414,31	418,07	419,82
2018	396,59	397,91	414,41	418,18	419,05
2019	398,23	399,94	416,91	421,22	424,05
2020	398,98	402,04	419,82	423,99	426,05
2021	412,67	413,20	422,30	426,61	427,49
2022	424,00	424,43	426,48	430,70	431,84

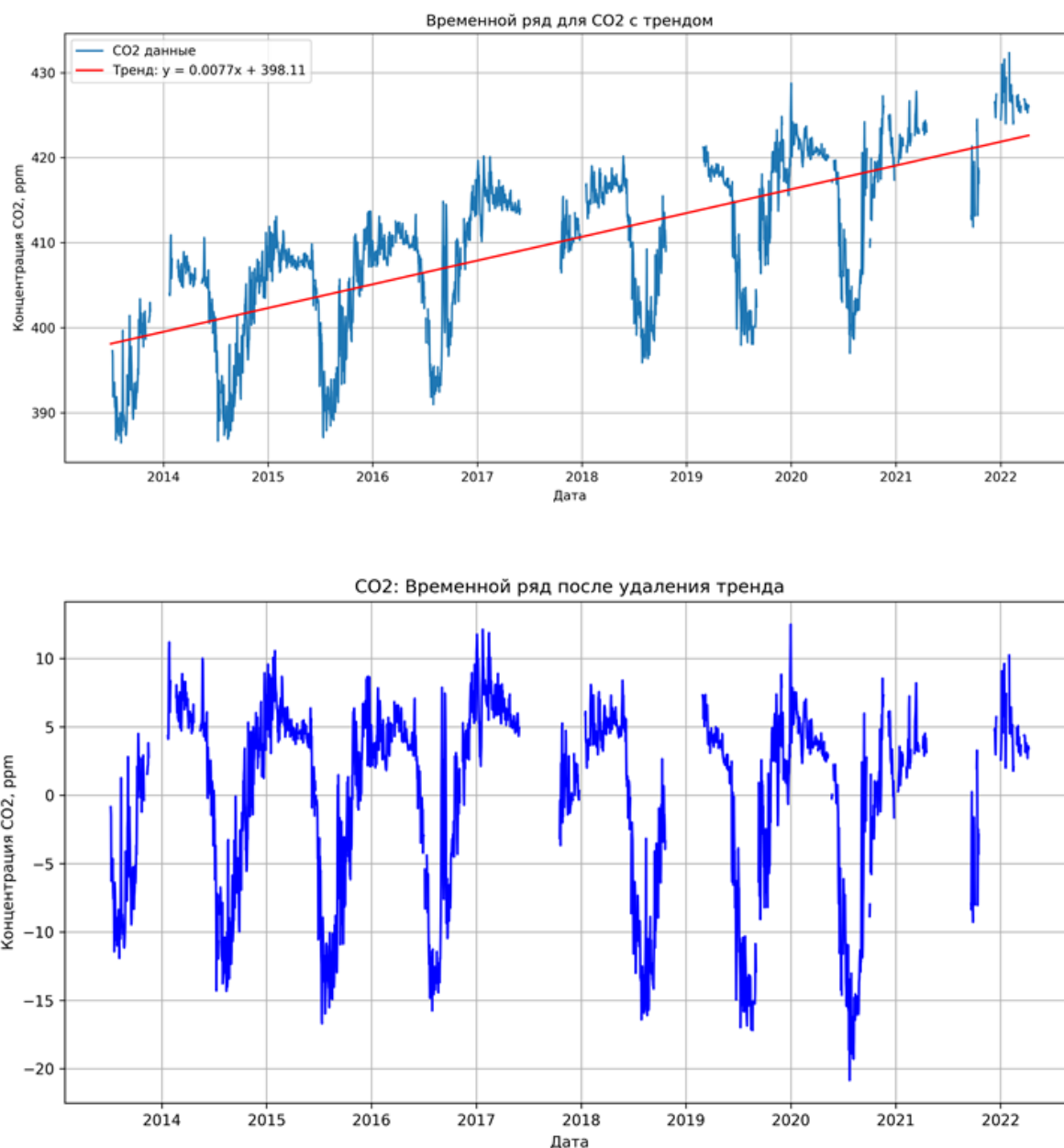


Рис.2.13 Исходный ряд среднесуточных концентраций углекислого газа с линией тренда и детрендированный ряд

Аналогично ситуации на ЛБМБ, в ряде наблюдений присутствует устойчивый положительный тренд, значительного изменения СКО при этом не наблюдается, происходит увеличение как медианных, так и максимальных значений. В целом, здесь наблюдаются более высокие значения, чем на Мысе Баранова, что объясняется степенью удаленности населенных пунктов и промышленности.

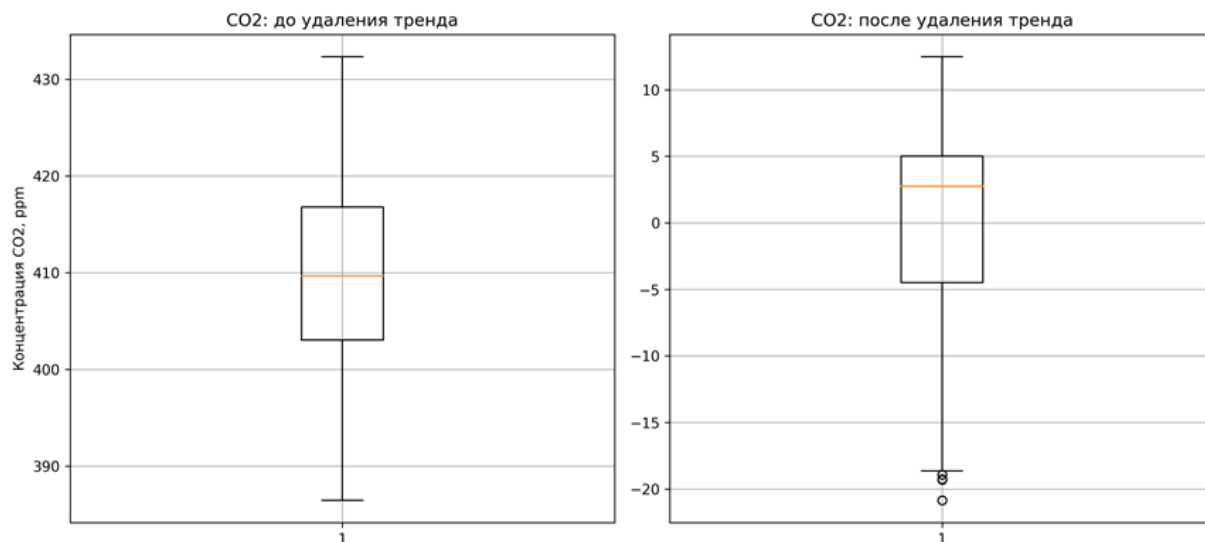


Рис.2.14 Боксплот исходного ряда среднесуточных концентраций углекислого газа и детрендированного ряда

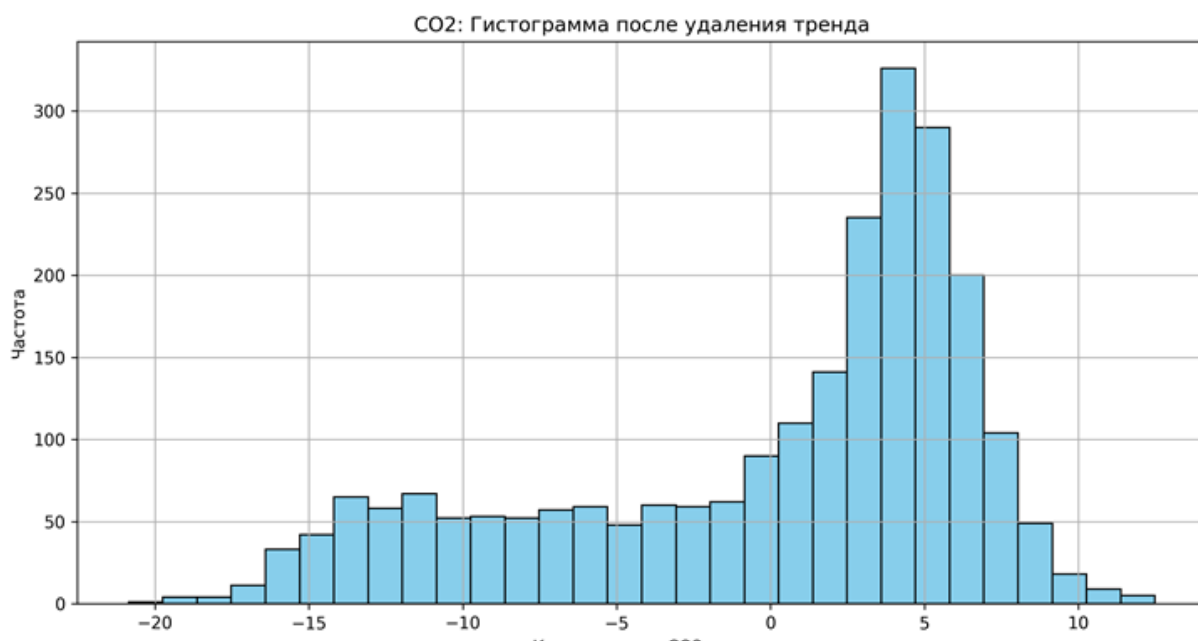


Рис.2.15 Гистограмма распределения детрендированного ряда

Годовое распределение также смещено вправо, что обусловлено продолжительным холодным периодом года, присутствуют выбросы в минимальных значениях. Больше количество выбросов в минимумы, что может быть связано с более интенсивной вегетацией в более теплые года и изменением в атмосферной циркуляции, интересно сравнить данные

концентраций с рядом среднесуточных температур, а также индексом южного колебания.

Общая статистика за весь период:

Среднее значение: 1.94

Стандартное отклонение: 0.03

Дисперсия: 0.00

Коэффициент вариации: 0.02

Минимум: 1.86

Максимум: 2.02

Асимметрия: 0.61

Эксцесс: 0,89

Ежегодный прирост составляет примерно 0,7 – 1,5%.

Таблица 2.11. Основные статистические характеристики ряда
среднесуточных концентраций CH_4

год	mean	std	min	max	Рост, %	missing
2013	1,9218	0,0223	1,8904	2,0044		19
2014	1,9157	0,0253	1,8601	2,0364	-0,31	19
2015	1,9150	0,0197	1,8664	1,9889	-0,04	40
2016	1,9145	0,0196	1,8693	1,9896	-0,03	29
2017	1,9370	0,0250	1,8832	2,0213	1,18	4
2018	1,9462	0,0275	1,8968	2,0697	0,47	9
2019	1,9559	0,0310	1,9025	2,1055	0,50	25
2020	1,9596	0,0180	1,9248	2,0331	0,19	163
2021	1,9643	0,0270	1,9115	2,0735	0,24	133
2022	1,9613	0,0196	1,9251	2,0184	-0,15	2

год	q01	q05	q50	q95	q99
2013	1,8907	1,8950	1,9165	1,9662	1,9914
2014	1,8656	1,8788	1,9151	1,9593	1,9928
2015	1,8728	1,8835	1,9148	1,9473	1,9742
2016	1,8775	1,8837	1,9134	1,9516	1,9638
2017	1,8888	1,8991	1,9367	1,9774	1,9984
2018	1,9003	1,9060	1,9440	1,9958	2,0382
2019	1,9103	1,9161	1,9539	2,0076	2,0311
2020	1,9264	1,9294	1,9594	1,9888	2,0012
2021	1,9137	1,9247	1,9623	2,0153	2,0454
2022	1,9258	1,9333	1,9606	1,9938	2,0073

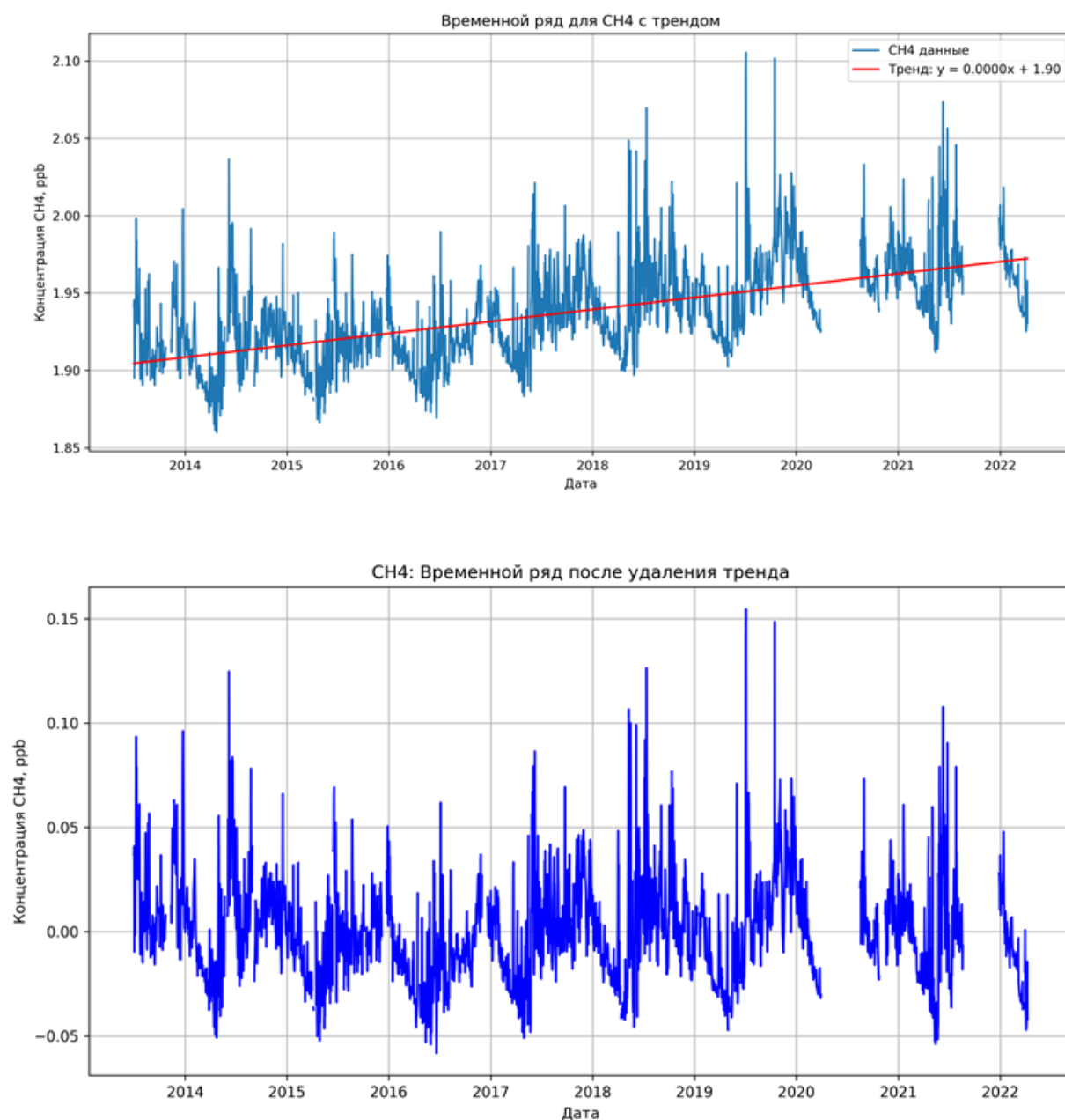


Рис.2.16 Исходный ряд среднесуточных концентраций метана с линией тренда и детрендированный ряд

В пос. Тикси наблюдается достаточно интересный годовой ход: в среднем максимумы приходятся на зимние месяцы, а минимумы на летние, причины этого были описаны ранее; однако максимальные среднесуточные величины фиксировались в теплый период года, это связано с тем, что Тикси находится на континенте и летом в Арктике, включая район Тикси, активизируются болотные экосистемы, выделяющие значительные объемы

метана, помимо этого таяние сезонных мерзлых почв высвобождает метан, накопленный в почвенных горизонтах. На протяжении наблюдений происходит стабильный рост минимальных значений, менее устойчивый, но более значимый рост медианы и максимумов. В 2017-2019 гг. увеличение СКО, появившееся за счет роста максимумов. Это может быть обусловлено изменением циркуляционных условий или повышением микробиологической активности, связанной с сравнительно более теплым годом.

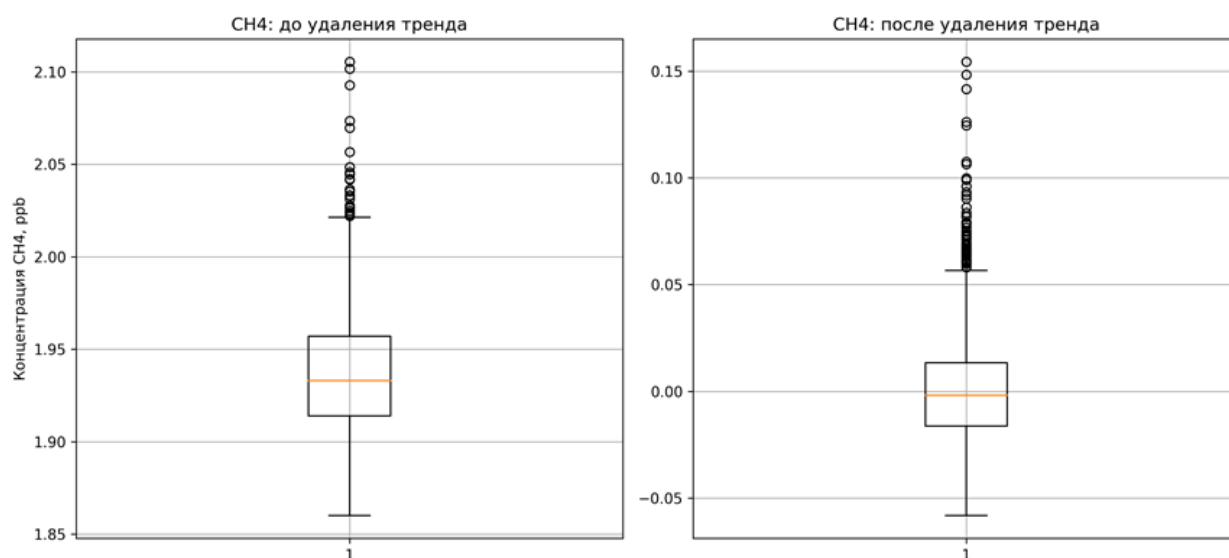


Рис.2.17 Боксплот исходного ряда среднесуточных концентраций метана и детрендированного ряда

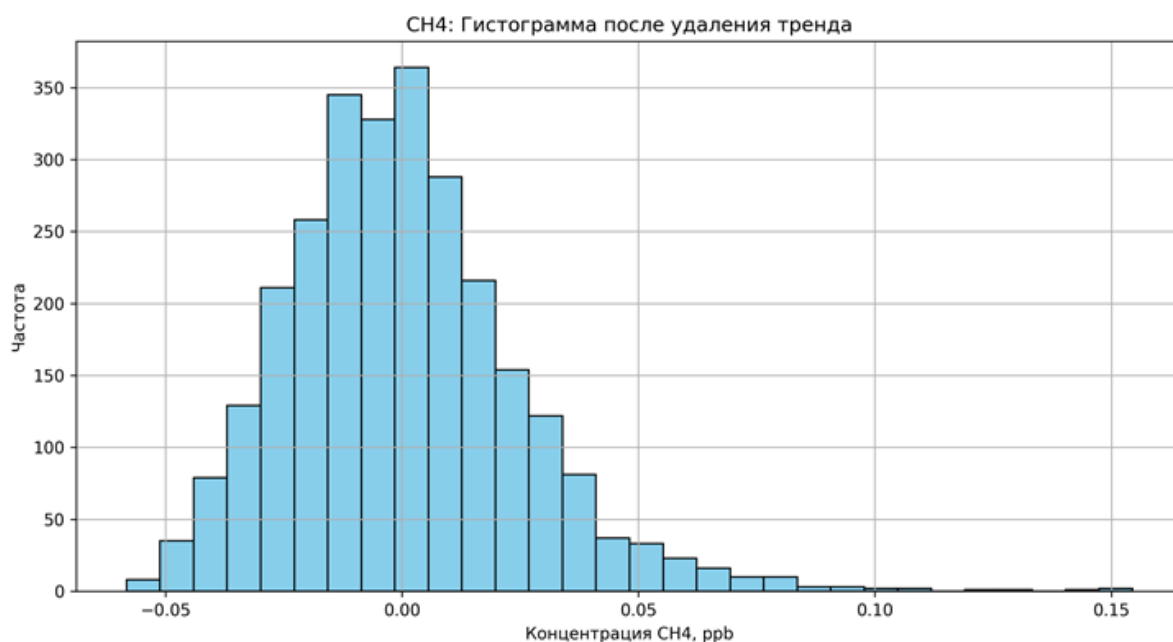


Рис.2.18 Гистограмма распределения детрендированного ряда

Годовое распределение концентраций метана на станции Тикси аналогично ЛБМБ – со значительным правым хвостом.

Общая статистика за весь период:

Среднее значение: 1.94

Стандартное отклонение: 0.03

Дисперсия: 0.00

Коэффициент вариации: 0.02

Минимум: 1.86

Максимум: 2.11

Асимметрия: 0.60

Эксцесс: 0,88

2.6. Разработка и развертывание базы данных

При выборе конкретного решения СУБД во внимание принимались следующие факторы:

1. Возможная скорость запросов при предполагаемом объеме данных и без использования сторонних оптимизаторов или таких инструментов, как Spark.
2. Простота работы и администрирования.
3. Наличие open-source решения.
4. «Живое» сообщество разработчиков, доступность и полнота сведений о функционале СУБД, качество технической документации и примеры решений основных проблем в открытых источниках.
5. Подходящий уровень доступности и надежности.

Для предполагаемого набора данных еще не существовало хранилища, соответственно вопроса о передаче данных между БД/необходимости миграции какой-либо их части не стояло.

В качестве основных вариантов рассматривались СУБД Postgres, MySQL и ClickHouse. Все три работают с SQL, имеют достаточно хорошую техническую документацию, большое сообщество разработчиков. ClickHouse обладает рядом значительных преимуществ, во многом обусловленных особенностями хранения данных. Это колоночная СУБД, позволяющая осуществлять быстрый поиск по значениям, благодаря чтению только конкретных колонок, вместо чтения всей строки; помимо этого, хранение данных в колонках позволяет экономить место на диске, наличие различных движков дают широкий выбор при выборе оптимального решения, однако эта СУБД требует значительных навыков администрирования, из-за чего могут возникнуть кадровые проблемы, также она плохо совмещается с распределенными файловыми хранилищами, например с HDFS (Hadoop Distributed File System), которые, в свою очередь, отлично подходят для хранения большого количества типовых файлов, которые и составляют архивы данных приборов, иными словами, могут возникнуть проблемы при дальнейшей разработке проекта; помимо этого хранилище, спроектированное для ClickHouse, с большой вероятностью потребует значительных изменений

при необходимости перехода на реляционную СУБД, что также является минусом.

Выбор между Postgres и MySQL определялся совершенно иными причинами. Обе СУБД – реляционные, даже диалекты SQL имеют практически идентичный набор функций и синтаксис. Основные отличия заключаются в принципах работы оптимизаторов и, конечно, в наличии в MySQL различных движков. На практике, в ААНИИ, для которого выполнялся проект, используются обе СУБД и, в общем случае, выбор любой из них допустим.

Размер хранилища до 1ТБ и простота предполагаемых типичных запросов к БД (выбор данных за определенный интервал времени, с данным флагом качества, с данной станции и т.д.) позволяют опустить вопрос работы оптимизатора. Различия в администрировании также незначительны. Наличие движков в MySQL позволяет подобрать оптимальное решение в конкретных случаях, однако усложняет работу, если не известно дальнейшее направление развития проекта.

Для работы с данными газоанализаторов могут быть необходимы также другие измерения, например для определения валидности показаний Pícarro требуются сведения о скорости и направлении ветра. Необходимо допустить, что при дальнейшей организации наблюдений (например, данных градиентных мачт или радиационных наблюдений) общие сведения, такие как информация о станции и приборах, стандартные метеонаблюдения, сведения о происшествиях, журналы станции и т.д. будет вынесены в отдельную БД, с которой также необходимо будет работать.

Исходя из вышеперечисленного, наиболее перспективной является СУБД Postgres. Также нужно отметить, что помимо приведенных преимуществ автор имеет больший опыт промышленной разработки именно с этой СУБД.

Теперь необходимо конкретизировать и проработать схему БД. Напомним, что данные получаются с четырех различных станций, при этом

начало производства наблюдений, перерывы, обусловленные внешними факторами и техническими сбоями, разумеется, отличаются. По этой причине логично разделить данные, как минимум, по разным таблицам, а лучше по разным схемам, чтобы избежать избыточности в наименованиях, а также ускорить обработку запросов. Помимо этого, запрос данных с конкретной станции вовсе не гарантирует наличие запроса данных с другой тем более, что объединение сведений разных станций в единый файл не рассматривается. По этим причинам для каждой станции использована своя схема данных и одна схема для общих сведений.

Схемы спроектированы с соблюдением третьей нормальной формы (3НФ), поскольку это решение позволяет соблюсти баланс между отсутствием избыточности и количеством JOIN'ов, используемых в запросах на чтение и просто в реализации. Помимо первичных ключей, обеспечивающих уникальность и консистентность данных и идемпотентность системы, других индексов изначально не предусмотрено. В таблицах измерений первичным ключом является дата-время производства измерения, она же является основной характеристикой для выборки данных, вероятность запроса по другим полям значительно меньше и наличие прочих индексов создаст избыточность, что, в конечном итоге, приведет к замедлению запросов на запись, сложностям при работе с DDL (Data Definition Language).

База данных «База данных концентраций парниковых газов на стационарах ААНИИ» предназначена для представления материалов наблюдений за приземной концентрацией парниковых газов на распределительной обсерватории: научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова», Гидрометеорологической обсерватории Тикси, Российского научного центра на архипелаге Шпицберген, НЭС «Северный Полус». Представляемые в базе данных параметры предназначены для использования при исследованиях динамики газового состава приземного слоя атмосферы и парникового эффекта.

В базе данных используется организация в виде нескольких схем (ER-диаграммы в приложении 1), каждая из которых отвечает за отдельный аспект данных:

common_data — содержит справочную информацию о производителях, моделях приборов, приборах, станциях наблюдений, рабочих диапазонах, ошибках, флагах качества данных, статусах предупреждений и причинах возгораний.

raw_data — хранит необработанные (сырые) данные измерений с разных станций (Baranova, Spitsbergen, LSP, Tiksi).

baranova, lsp, spitsbergen, tiksi — схемы для хранения предобработанных и агрегированных данных по конкретным станциям.

minutes_common — хранит данные, осредненные до минутных, позволяет эффективно отслеживать введение флагов и калибровочных коэффициентов, а также предоставлять и исследовать более детальную информацию по запросу.

Описание структуры схем:

1. *common_data*

Содержит таблицы для хранения общей информации:

manufacturers — справочник производителей приборов (название, страна).

models — справочник моделей приборов, связанных с производителями.

stations — список станций наблюдений, включая координаты и идентификаторы SYNOP.

devices — перечень конкретных экземпляров приборов, установленных на станциях (с указанием серийных номеров, периода эксплуатации и модели прибора).

parameters — параметры, влияющие на работу приборов, связанные с конкретным прибором.

work_ranges — рабочие диапазоны параметров моделей приборов.

errors — справочник возможных ошибок приборов, связанных с параметрами и моделями.

flags — флаги качества данных.

alarms_statuses — статусы системных предупреждений для моделей приборов.

burning_reasons — причины возгораний, которые могут влиять на концентрации газов в атмосфере.

2. raw_data

Хранит сырые данные измерений для каждой станции:

baranova, *spitsbergen*, *lsp*, *tiksi* — в каждой таблице фиксируются параметры работы приборов и измеренные концентрации CO₂ и CH₄ в привязке ко времени (*datetime*).

3. Станционные схемы (*baranova*, *spitsbergen*, *lsp*, *tiksi*)

Хранят обработанные данные:

Ошибки работы приборов: таблицы *errors_** содержат данные об ошибках, привязанных к времени и типу ошибки.

Часовые и суточные усредненные значения: таблицы *hourly_** и *daily_** содержат концентрации загрязняющих веществ (CO₂, CH₄, O₃) с расчетами стандартных отклонений и применяемыми флагами качества.

Калибровочные данные: таблицы **_calibrations* и **_calibrations_list* содержат информацию о проведенных калибровках приборов, их периодах и результатах.

Данные о неисправностях: таблицы **_malfunctions* содержат информацию о зарегистрированных неисправностях приборов с описанием и периодами неисправности.

Показания калибровочных баллонов: таблица *picarro_balloons_concentration* хранит информацию о концентрациях эталонных газов.

Схема базы данных приведена в приложении 1.

2.7 Инфраструктура и мониторинг

Помимо БД, для нормальной работы с системой нужны также компоненты, позволяющие развернуть UI, обеспечить работу кода обработчиков и взаимодействие UI и БД, организовать мониторинг компонент системы и непосредственно ресурсов VM. При этом необходимо обеспечить изолированную работу всех составляющих, для чего удобно использовать Docker.

Docker – это инструмент контейнеризации, он позволяет изолировать приложения, помещенные в различные контейнера, одновременно с этим не резервируя под них ресурсы системы, чем выгодно отличается от набора виртуальных машин; помимо этого Docker также позволяет упростить процесс доставки приложений.

В рамках данной работы рассматривается только серверная часть приложения, отвечающая за хранение данных и мониторинг. Все компоненты приложения организованы посредством docker-compose, compose-файл можно логически разделить по функционалу:

1. Хранение данных, т.е. контейнер Postgres.
2. Мониторинг. Для этой цели используется связка Prometheus, для сбора метрик, и Grafana, для визуализации получаемых значений и настройки алертов. Для передачи метрик Prometheus также разворачиваются контейнеры postgres-exporter и node-exporter.

Установка средств администрирования, например, pgadmin, непосредственно на VM или в контейнере не предполагается, подключение администратора к БД может осуществляться посредством консоли или сторонних приложений, например DBeaver.

Выбор версий для большинства образов контейнеров не требует дополнительных пояснений, используются последние стабильные LTS (Long term support) версии и alpine (“легкие” версии), где это возможно. Однако для

контейнера Grafana выбрана более старая версия – девятая, при наличии вышедшей одиннадцатой. Это объясняется тем, что в десятой версии выявлен значительный в данном случае баг, не позволяющий привязать передачу алертов к Telegram-боту, то есть фактически здесь не доступен наиболее удобный способ получения предупреждений о каких-либо неисправностях/событиях. В то же время недавно вышедшая одиннадцатая версия может содержать неизвестные на момент развертывания приложения ошибки. Однако поскольку Grafana обладает высокой обратной совместимостью при наличии необходимости переход к более новой версии не будет проблемой.

Для работы с проектом организован репозиторий в GitLab, доставка кода на сервер осуществляется через GitLab CI, GitLab-runner поднят на том же сервере в качестве демона.

3. Модельные и натурные данные. Сравнительный анализ

В данной главе рассмотрены дополнительные источники данных о концентрациях ПГ, такие как спутниковые наблюдения и реанализ; приведены результаты статистического анализа рядов наблюдений за ПГ по данным различных источников, а также их сравнительная характеристика. В заключительном разделе главы исследована возможность использования результатов реанализа при восстановлении рядов натурных приземных наблюдений.

3.1. Данные спутниковых наблюдений

Спутниковые приборы, такие как AIRS (инфракрасные зонды), сенсоры TANSO-FTS и TANSO-CAI, установленные на японском спутнике GOSAT, а также сенсоры TROPOMI, размещённые на спутнике Европейского космического агентства Sentinel-5 Precursor (программа Copernicus), обеспечивают получение вертикальных профилей концентраций газов в атмосфере. Эти профили, как правило, охватывают весь вертикальный столб — от поверхности Земли до верхних слоёв атмосферы.

Для корректного сопоставления наземных и спутниковых данных необходимо учитывать следующие ключевые аспекты:

1. Пространственное и временное согласование данных. Время и координаты спутниковых пролётов должны максимально точно соответствовать точкам наземных измерений. Это позволяет проводить прямое сравнение профилей парниковых газов и их концентраций у поверхности Земли без пространственно-временных искажений.
2. Вертикальное разрешение. Спутниковые измерения обычно усреднены по широким вертикальным слоям, в то время как наземные данные дают

более детальную информацию у приземного уровня. Это различие следует учитывать при сравнении результатов.

3. Качество и согласованность данных. Наземные измерения, как правило, более точные, но ограничены пространственно. Спутниковые данные охватывают большие площади, однако их пространственное разрешение может быть ниже. Важно оценивать и сопоставлять качество обоих типов данных.
4. Методы верификации. Для количественной оценки согласованности между спутниковыми и наземными измерениями необходимо применять статистические методы, включая корреляционный анализ и метрики ошибок.
5. Местные факторы. На приземные измерения существенно влияют локальные источники и поглотители газов, которые не всегда могут быть идентифицированы спутниковыми средствами. Учёт местных метеорологических условий и источников выбросов критически важен для интерпретации расхождений в данных.

Наблюдения в рамках программы Copernicus за концентрациями CO₂ и CH₄ ведутся с 2003 года.

3.1.1. Применение спутниковых данных для климатического мониторинга

В 2024 году Лабораторией экспериментальной климатологии Арктики ААНИИ было проведено исследование применимости спутниковых данных для климатического мониторинга активных парниковых газов на арктических станциях на примере ЛБМБ. В соответствии с результатами, полученными на основе данных ЛЭКА [27], были сделаны следующие выводы:

Диоксид углерода

Спутниковые наблюдения демонстрируют стабильный рост концентраций CO₂ на протяжении года с плавным снижением в летний период, достигая минимума к его концу. Наземные измерения показывают более выраженные колебания, что, вероятно, связано с локальными особенностями

окружающей среды, погодными условиями и деятельностью на станции. Спутниковые данные, усреднённые по большой территории, отражают сглаженную картину изменений.

Тем не менее, оба типа данных показывают общую тенденцию к росту атмосферного содержания CO_2 .

Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми измерениями составил 0,34, что свидетельствует о наличии общего направления изменения при различиях в абсолютных значениях. Среднеквадратичная ошибка составила 7,49 ppm, средняя абсолютная ошибка — 6,60 ppm, средняя абсолютная процентная ошибка — 1,59%.

Это указывает на хорошую относительную согласованность между наземными и спутниковыми данными, несмотря на наличие абсолютных расхождений.

Метан

Наземные наблюдения показывают снижение концентраций CH_4 в начале года, за которым следуют аperiодические колебания и несколько пиков, особенно заметных осенью 2020 года. Спутниковые данные демонстрируют общую тенденцию к увеличению концентраций CH_4 с максимумом в середине лета и незначительным снижением к концу года. Различие в динамике объясняется тем, что спутниковые измерения представляют усреднённую картину на значительной территории, в то время как наземные данные отражают локальные, зачастую более изменчивые условия.

Коэффициент корреляции между наземными и спутниковыми рядами составил $-0,16$, что указывает на отсутствие линейной зависимости между данными. Средняя ошибка составила 175,67 ppb, средняя абсолютная разница — 164,22 ppb, средняя абсолютная процентная ошибка — 8,26 %.

Эти значения подчёркивают слабую согласованность между наземными и спутниковыми наблюдениями за метаном. Причинами расхождений могут быть локализованные источники выбросов, специфические метеоусловия и

различия в методах измерения. Данная проблема требует дальнейшего изучения и совершенствования алгоритмов сопоставления данных.

Таким образом, спутниковые наблюдения представляют собой важный инструмент мониторинга климатически активных газов на глобальном и региональном уровнях. Их основное преимущество заключается в широком пространственном охвате и возможности получения непрерывных временных рядов. Однако для применения этих данных в локальном климатическом анализе, особенно в условиях Арктики, необходимо учитывать ряд ограничений: усреднённое вертикальное и пространственное разрешение, влияние облачности и специфики алгоритмов интерпретации данных.

Сравнение спутниковых и наземных измерений показывает, что несмотря на общую согласованность трендов для CO_2 , значения могут существенно различаться в зависимости от типа источника данных и местных условий. В случае с метаном наблюдаются значительные расхождения, что требует дополнительного анализа и учёта особенностей распределения локальных источников выбросов.

Для получения более полной и точной картины состояния атмосферы необходимо использовать комплексный подход, объединяющий данные различных типов. В следующем разделе рассматриваются наземные наблюдения, обладающие высокой точностью и детальностью, а также данные реанализа, позволяющие воспроизвести пространственно-временную динамику метеорологических и климатических параметров на основе синтеза наблюдений и моделей.

3.2. Численное моделирование

Численное моделирование в климатических исследованиях представляет собой использование математических моделей для описания физических процессов в атмосфере, океане, криосфере и на поверхности суши. Оно включает решение системы уравнений, основанных на законах

сохранения массы, импульса и энергии. Особое значение численное моделирование приобретает при анализе концентраций климатически активных газов, таких как углекислый газ, метан и озон.

Одним из ключевых инструментов численного моделирования является реанализ — процесс, в котором наблюдения за прошедший период ассимилируются в рамках единой модели атмосферы. Это позволяет получить однородные, всесторонние оценки атмосферных параметров с высокой пространственно-временной детализацией [28].

Реанализы особенно важны для регионов с ограниченным покрытием наблюдений, таких как Арктика, поскольку позволяют восполнить пробелы в данных и проанализировать пространственно-временные особенности распределения парниковых газов. Они широко используются в работах по изучению изменений климата в Арктике и за её пределами [2, 3].

3.2.1. Реанализ ECMWF

Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) предоставляет один из наиболее современных наборов реанализа атмосферы — CAMS Reanalysis [29].

Он создаётся на базе интегрированной прогностической системы IFS (версия CY42R1) с использованием сложной схемы ассимиляции данных [30]. Ассимиляция включает спутниковые измерения профилей газов, такие как данные с миссий GOSAT и Sentinel-5P, данные приземных наблюдений и результаты численного моделирования. CAMS отличается высокой разрешающей способностью по пространству ($0.75^\circ \times 0.75^\circ$, сетка T255) и по времени — трехчасовые интервалы.

Основные особенности реанализа CAMS:

1. Обеспечивает концентрации CO_2 и CH_4 как для приземного уровня, так и для всей атмосферы;
2. Используются последние доступные спутниковые миссии, такие как GOSAT и Sentinel-5P;

3. Содержит известные ограничения, связанные с трудностями в ассимиляции данных при наличии облачности и в высокоширотных регионах [31].

4. Для свободного использования доступен ряд реанализа 2003 – 2022 гг.

Помимо CAMS, в научной практике используются и другие реанализы, пригодные для оценки приземных концентраций CO_2 , CH_4 и O_3 :

ERA5 (ECMWF Reanalysis v5). Разработан также ECMWF в рамках программы Copernicus Climate Change Service (C3S) [32]. ERA5 обеспечивает данные о метеорологических параметрах и, в некоторой степени, об атмосферных концентрациях, однако напрямую концентрации парниковых газов представлены ограниченно. Тем не менее, некоторые переменные можно использовать совместно с продуктами CAMS.

MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2). Разработан NASA [33]. Обеспечивает данные о концентрациях озона и включает специальные наборы для анализа химического состава атмосферы, однако представленные в виде концентраций в столбе атмосферного воздуха, а не на определенных поверхностях. Для анализа CO_2 и CH_4 требуется использование дополнительных моделей, сопряжённых с MERRA-2.

JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis). Выпущен Японским метеорологическим агентством [34]. Специализируется на классических метеорологических переменных. Хотя прямые данные о концентрациях парниковых газов отсутствуют, JRA-55 используется как фон для регионального моделирования концентраций.

GEOS-Chem Adjoints and Reanalyses. Модель химического транспорта, сопряжённая с различными реаналитическими полями, включая MERRA-2 и другие, используется для исследования распределения CO_2 , CH_4 и O_3 . Данные подходят для региональных исследований [35].

Для задач мониторинга приземных концентраций CO_2 , CH_4 и O_3 предпочтение следует отдавать продуктам, в которых реализована

ассимиляция химических наблюдений, таких как CAMS (ECMWF) или, в ограниченной степени, MERRA-2 (для озона).

Выбор CAMS в рамках данного исследования обусловлен его специализацией на концентрациях парниковых газов, высокой временной и пространственной разрешающей способностью.

3.3 Сравнительный анализ

В данной подглаве приведен сравнительный статистический анализ рядов реанализа CAMS и натурных данных, полученных на станциях ЛБМБ и Тикси. В обоих случаях взяты максимально продолжительные временные интервалы, присутствующие в обоих рядах, поэтому длины рядов по станциям различны. Поскольку целью анализа является установление возможности использования рядов реанализа для проведения мониторинга в конкретных точках, различная продолжительность рядов не имеет значения, однако при наличии общих тенденций может иметь смысл использование только результатов анализа данных, полученных при более продолжительных наблюдениях.

3.3.1. Ледовая база Мыс Баранова

Общий период, присутствующий в рядах, соответствующих ЛБМБ составляет около 5 лет - с 2015-11-01 по 2020-12-31. Процент пропусков в ряду натурных данных при этом значителен и во всех случаях составляет не менее 30% с максимумом, приходящимся на 2017 г. - в этом году валидны менее 64% всех данных (из ряда удалены данные, невалидные по условиям ветрового режима). Однако пропуски распределены достаточно равномерно по всем сезонам (рис. 3.1).

*Таблица 3.1. Метрики сравнительного анализа рядов натуральных данных
и реанализа на ЛБМБ*

Параметр	CO ₂	CH ₄
Наклон	1.06	0.81
Сдвиг	-25.86	0.37
R ² (коэффициент детерминации)	0.895	0.71
Средняя абсолютная ошибка	1.94 ppm	0.0131 ppb
Среднеквадратическая ошибка	2.43 ppm	0.0176 ppb
Смещение (систематическая ошибка)	~0	~0
Корреляция	0.946	0.843

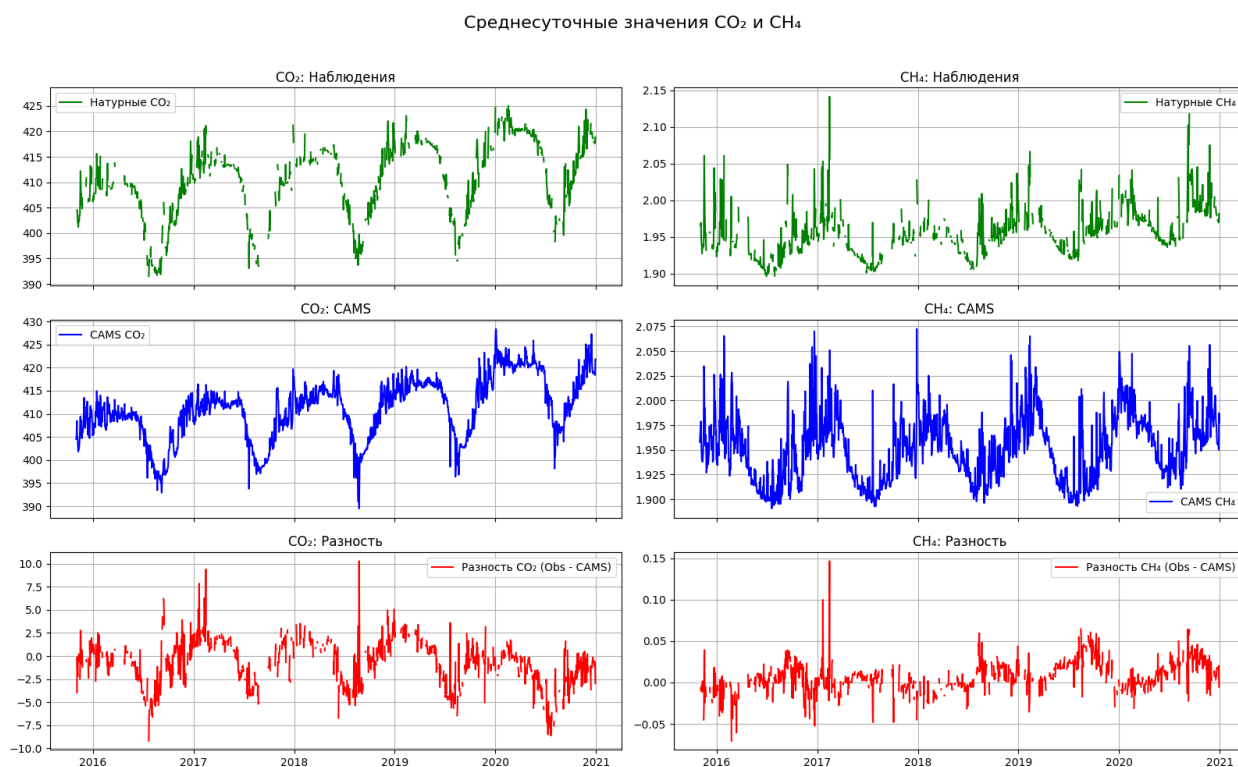


Рис. 3.1 Графические представления рядов натуральных данных и реанализа CO₂ и CH₄, а также их разности, полученных для станции ЛБМБ (только данные с флагом качества 1)

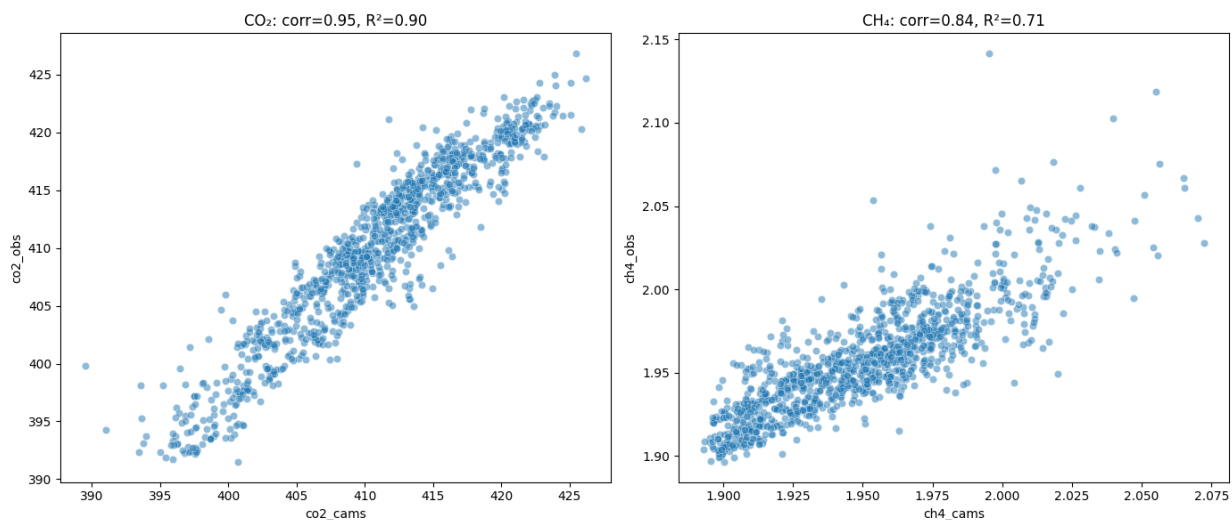


Рис. 3.2 Корреляция рядов натурных данных и реанализа CO₂ и CH₄, а также их разности, полученных для станции ЛБМБ (только данные с флагом качества 1)

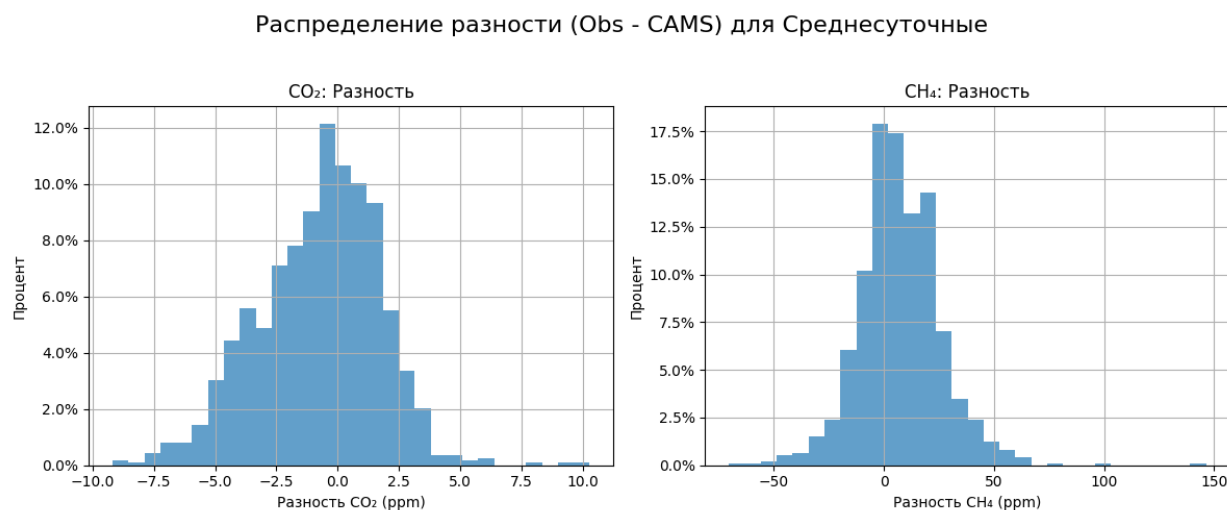


Рис. 3.3 Гистограммы разностей значений рядов наблюдений и реанализа для станции ЛБМБ

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- Для CO₂:

Реанализ CAMS в среднем несколько завышает значения относительно реальных данных. В целом, реанализ склонен усиливать экстремумы и, в данном случае, происходит завышение значений, поскольку мы имеем дело со станцией Арктического региона, где период вегетации (т.е. активного стока углекислого газа) значительно короче холодного сезона.

Модель реанализа обладает высокой объясняющей способностью, почти 90% дисперсии наблюдаемых значений объясняется модельными данными, при этом между рядами наблюдается сильная положительная связь.

Несмотря на высокую корреляцию и небольшие абсолютные ошибки (СКО = 1.94 ppm, дисперсия = 2.43 ppm), следует отметить, что величина межгодового прироста концентрации CO₂ в этом регионе составляет порядка 1.9–3 ppm/год. То есть ошибки реанализа сопоставимы по величине с климатическим трендом, что ограничивает возможности использования CAMS для оценки долгосрочных изменений концентрации CO₂ без дополнительной обработки или корректировки данных, поскольку, несмотря на хорошо передаваемую сезонную изменчивость и общий тренд, межгодовой прирост может быть искажен из-за сопоставимой с ним величины ошибки.

- Для CH₄:

Реанализ CAMS также способен воспроизводить поведение концентраций метана, однако степень согласованности с наблюдаемыми данными ниже, чем для CO₂. Величина коэффициента детерминации составляет $R^2 = 0.71$, что указывает на умеренную объясняющую способность модели. Корреляция между рядами — положительная и достаточно сильная, однако заметно ниже, чем для CO₂.

В целом, модель реанализа склонна к занижению минимумов и слабому усилению максимумов, особенно в последние годы, когда ошибки в максимумах не превышают 0.25 ppb. У гистограммы ошибок для CH₄ можно наблюдать достаточно выраженный правый хвост, что наглядно иллюстрирует данный пункт.

Изменение среднегодовых значений приземных концентраций CH_4 варьируется в достаточно широком диапазоне: от -0.2 до более чем 1 ppb, тренд изменения средних концентраций метана нелинеен и доступный ряд наблюдений слишком короток для достаточно точного его определения. В целом, можно сказать, что модель реанализа хорошо описывает качественные изменения в концентрациях метана. Вероятно, подобные ошибки во многом вызваны природой высвобождения и стока метана в Арктическом регионе, поскольку эмиссия CH_4 здесь в значительной степени зависит от локальных условий — таких как температура верхнего слоя почвы, наличие мерзлоты, гидрологический режим и биологическая активность торфяников и болот. Эти процессы слабо параметризуются в глобальных моделях, особенно в реанализе, основанном на усреднённых и масштабных оценках.

3.3.2. Тикси

Для Гидрометеорологической обсерватории Тикси выводы более противоречивы, чем в случае ЛБМБ. Графическое представление рядов представлено на рис. 3.4.

Среднесуточные значения CO₂ и CH₄

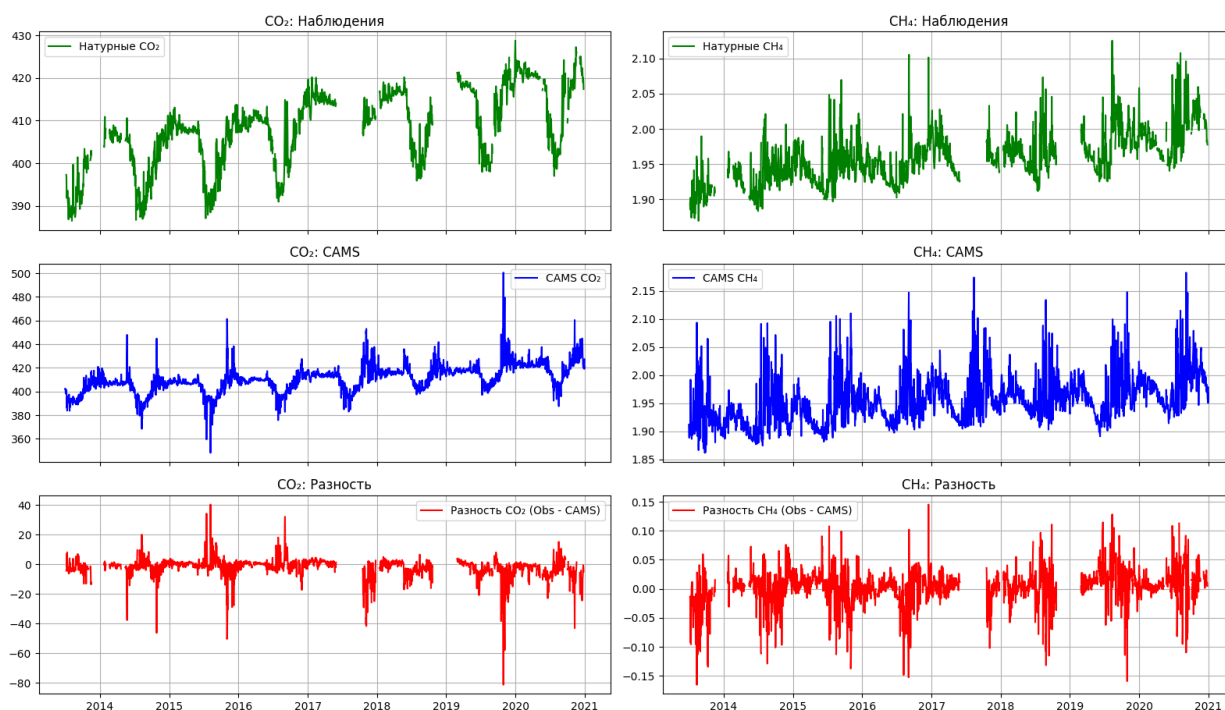


Рис. 3.4 Графические представления рядов натуральных данных и реанализа CO₂ и CH₄, а также их разности, полученных для станции Тикси (только данные с флагом качества 1)

Таблица 3.2. Метрики сравнительного анализа рядов натуральных данных и реанализа на станции Тикси

Параметр	CO ₂	CH ₄
Наклон	0.64	0.58
Сдвиг	146.6	0.82
R ² (коэффициент детерминации)	0.69	0.47
Средняя абсолютная ошибка	3.77	0.0182
Среднеквадратическая ошибка	4.98	0.0256
Смещение (систематическая ошибка)	~0	~0

Корреляция	0.83	0.69
------------	------	------

Анализ временных рядов концентраций углекислого газа и метана из реанализа для Тикси и ЛБМБ показывает, что основная сезонная структура воспроизводится корректно на обеих станциях. Однако в случае станции Тикси реанализ демонстрирует аномально резкие экстремумы, особенно в периоды перехода между зимним и летним сезонами — начала и окончания вегетационного периода. Абсолютные отклонения от натурных данных могут достигать 15 ppm для CO₂ и 0.10 ppm для CH₄ в пределах одного сезона. Это указывает на переоценку экстремальных значений моделями реанализа.

Несмотря на это, основные сезонные тренды и годовая цикличность передаются достаточно хорошо. При исключении периодов резких флуктуаций, наблюдается сильная корреляция между натурными и реанализационными данными CO₂ и умеренная корреляция по CH₄.

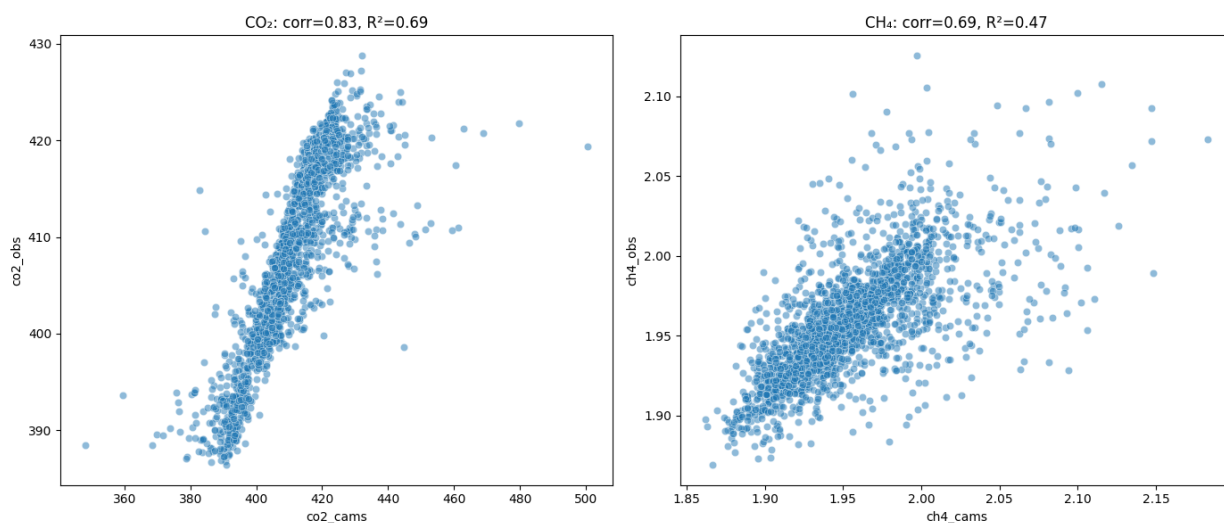


Рис. 3.5 Корреляция рядов рядов натурных данных и реанализа CO₂ и CH₄, а также их разности, полученных для станции Тикси (только данные с флагом качества 1)

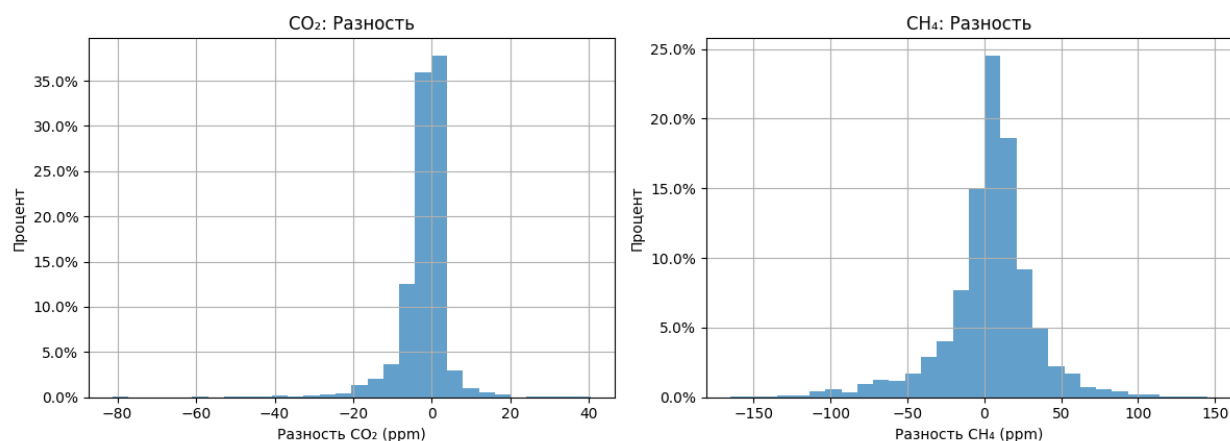


Рис. 3.6 Гистограммы разностей значений рядов наблюдений и реанализа для станции Тикси

В обоих случаях гистограммы распределения ошибок имеют значительные левые хвосты, что указывает на завышение значений реанализом.

Поскольку станция Тикси находится на материке, в отличие от ЛБМБ, в ряду ожидалось большие экстремумы, однако расхождения с реанализом очень велики, поэтому дополнительно рассмотрено сравнение рядов реанализа для станций ЛБМБ и Тикси.

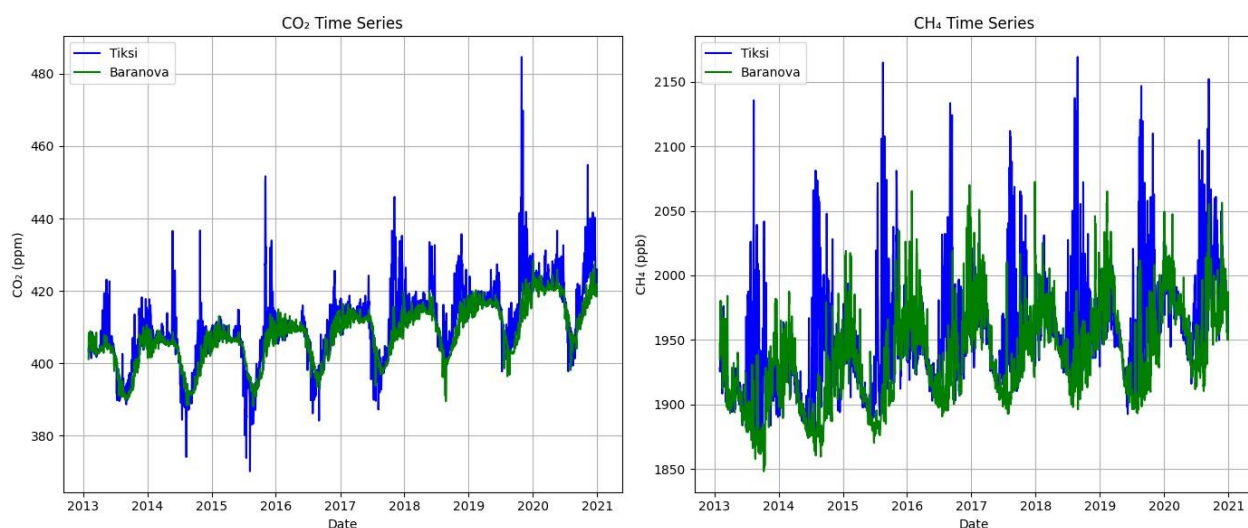


Рис. 3.7 Сравнение рядов приземных концентраций метана и углекислого газа, полученных посредством реанализа CAMS для станций ЛБМБ и Тикси

Видно, что сезонные колебания и амплитуда концентраций метана на станции Тикси выражены гораздо сильнее, чем на ЛБМБ. Особенно заметны резкие зимние пики CH_4 , превышающие 2100 ppb, которые практически отсутствуют на островной станции. Подобное поведение также характерно для рядов натурных наблюдений и его можно объяснить физически рядом факторов.

Станция Тикси расположена в зоне многолетней мерзлоты и болотистой тундры — мощного природного источника метана. В зимний период, при наличии температурной инверсии и слабой турбулентной вентиляции, метан, выделяющийся из почвы и болот, может накапливаться в приземном слое атмосферы, что приводит к резким локальным всплескам концентрации. Кроме того, отсутствие активного фотохимического разрушения CH_4 в это время года способствует его устойчивому присутствию в атмосфере. В летний период наблюдается некоторое снижение концентраций, однако по сравнению с ЛБМБ амплитуда остается более значительной, что может быть связано с сезонным оттаиванием почвы и последующим выбросом метана.

В отличие от Тикси, станция ЛБМБ расположена на острове, окружённом морем, где локальные источники метана выражены значительно слабее. Морская поверхность в целом является менее активным источником CH_4 , а хорошая циркуляция воздуха и отсутствие крупных источников на суше способствуют формированию более гладкого и фоновое временного ряда. Таким образом, поведение метана на станции ЛБМБ в большей степени отражает глобальные тенденции, в то время как в Тикси существенную роль играют локальные природные и метеорологические факторы.

Поведение углекислого газа на обеих станциях также демонстрирует различия. Несмотря на то, что CO_2 в целом распределён более равномерно в атмосфере по сравнению с CH_4 , в районе Тикси также наблюдаются всплески, особенно в зимний период. Это может быть связано как с естественными источниками (почвенное дыхание, разложение органики), так и с антропогенными выбросами, такими как отопление зданий и работа

дизельных генераторов в посёлке Тикси. В сочетании с малой вертикальной вентиляцией в зимний период это приводит к локальному накоплению CO_2 в приземном слое. Для ЛБМБ таких факторов почти нет, и её временной ряд CO_2 представляет собой более сглаженную сезонную кривую, близкую к глобальному тренду.

Таким образом, демонстрируемый данными реанализа ход концентраций углекислого газа и метана действительно физически обоснован и качественно верен, однако оценка экстремумов в значительной мере ошибочна. Такое поведение, вероятно, обусловлено как ограничениями пространственного разрешения моделей, так и неполным учётом локальных условий, характерных для арктических районов. В частности, для Тикси — наличие мерзлоты, болот и ограниченной вертикальной вентиляции зимой — действительно может приводить к локальным всплескам концентраций, однако реанализ, по-видимому, не способен точно описать их амплитуду и временное положение. В результате экстремумы оказываются не просто усиленными, а существенно искажёнными по сравнению с реальными измерениями.

Таким образом, можно заключить, что, хотя в арктических условиях модели реанализа способны воспроизводить общие тенденции концентраций парниковых газов, они часто переоценивают экстремумы — особенно в континентальных или прибрежных районах. Это необходимо учитывать при интерпретации результатов и построении климатических оценок по данным реанализа.

Заключение

В данной работе рассмотрена возможность использования данных численного моделирования приземных концентраций климатически активных газов для проведения климатического мониторинга парниковых газов на стационарах Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ).

В ходе исследования проведен сбор и систематизация архивных данных приземных концентраций CO_2 и CH_4 с 2013 года или с момента начала наблюдений по станциям Российского научного центра на архипелаге Шпицберген, ледовой базы «Мыс Баранова» и гидрометеорологической обсерватории Тикси. В работе описаны методики наблюдений, процедуры первичной обработки данных и алгоритмы их анализа.

На основе собранных данных разработана база данных, включающая систему хранения и управления сведениями о концентрациях парниковых газов. БД получила государственную регистрацию [Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2024625702], что подтверждает ее значимость и практическую ценность. Кроме того, произведен сбор и анализ метаданных, что позволило систематизировать информацию о методах измерений, условиях наблюдений и возможных источниках погрешностей. Работы выполнены в рамках Соглашения ФГБУ "ААНИИ" № 169–15–2023–002 от 01.03.2023 г. в ходе реализации ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», а также в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021-2030 гг. (соглашение № 169-03-2024-072 от 24.06.2024).

Произведено сравнение фактических данных с результатами реанализа ECMWF на уровне 1000 гПа. Оценена точность моделирования концентраций ПГ, определена степень расхождения между расчетными и измеренными значениями, а также указаны потенциальные причины этих расхождений,

таким образом определена возможность использования данных реанализа при проведении климатического мониторинга, либо в целях восстановления длительных пропусков в рядах наблюдений со следующим выводом.

Настоящая работа представляет собой комплексное исследование, направленное на оценку надежности данных численного моделирования и их применения для климатического мониторинга. Результаты данного исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов анализа атмосферных данных, улучшения параметризаций моделей и повышения точности прогнозирования изменений газового состава атмосферы в Арктическом регионе.

Список использованных источников

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Электронный ресурс] / ред. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. и др. – Cambridge University Press, 2021. – Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
2. Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // Science. – 2007. – Vol. 315, № 5818. – P. 1533–1536. – DOI: 10.1126/science.1139426.
3. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C. et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature Geoscience. – 2014. – Vol. 7, № 9. – P. 627–637. – DOI: 10.1038/ngeo2234.
4. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. – 2015. – Vol. 520. – P. 171–179. – DOI: 10.1038/nature14338.
5. Overland J.E., Dethloff K., Francis J.A. et al. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // Nature Climate Change. – 2016. – Vol. 6. – P. 992–999. – DOI: 10.1038/nclimate3121.
6. Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S. et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. – 2014. – Vol. 11. – P. 6573–6593. – DOI: 10.5194/bg-11-6573-2014.
7. Le Quéré C., Andrew R.M., Friedlingstein P. et al. Global Carbon Budget 2018 // Earth System Science Data. – 2018. – Vol. 10. – P. 2141–2194. – DOI: 10.5194/essd-10-2141-2018.
8. Friedlingstein, P, O'sullivan, M, Jones, MW et al. Global Carbon Budget 2023 // Earth System Science Data, – 2023 – Vol. 15. – no. 12. – P. 5301-5369. – DOI: [10.5194/essd-15-5301-2023/](https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023/).

9. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M. et al. Global Carbon Budget 2022 // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14. – P. 4811–4900. – DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.
10. Falkowski P., Scholes R.J., Boyle E. et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system // *Science*. – 2000. – Vol. 290, № 5490. – P. 291–296. – DOI: 10.1126/science.290.5490.291.
11. NOAA. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: Global Monitoring Laboratory [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
12. Archer D., Eby M., Brovkin V. et al. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2009. – Vol. 37. – P. 117–134. – DOI: 10.1146/annurev.earth.031208.100206.
13. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth System Science Data*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1561–1623. – DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
14. Ehhalt D.H., Prather M.J., Dentener F.J. et al. Atmospheric chemistry and greenhouse gases // *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC* / ред. Houghton J.T. и др. – Cambridge University Press, 2001. – P. 239–287.
15. Shindell D., Kuylensstierna J.C.I., Vignati E. et al. Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security // *Science*. – 2012. – Vol. 335, № 6065. – P. 183–189. – DOI: 10.1126/science.1210026.
16. NOAA. Trends in Atmospheric Methane: Global Monitoring Laboratory [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/
17. Nisbet E.G., Manning M.R., Dlugokencky E.J. et al. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2020. – Vol. 34, № 9. – DOI: 10.1029/2019GB006270.

18. UNEP. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions [Электронный ресурс]. – Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021. – Режим доступа: <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>
19. Fiore A.M., Naik V., Leibensperger E.M. Air quality and climate connections // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2015. – Vol. 65, № 6. – P. 645-685. – DOI: 10.1080/10962247.2015.1040526.
20. Monks P.S., Archibald A.T., Colette A. et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2015. – Vol. 15, № 15. – P. 8889–8973. – DOI: 10.5194/acp-15-8889-2015.
21. Shindell D., Faluvegi G., Koch D. et al. Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions // Science. – 2009. – Vol. 326, № 5953. – P. 716–718. – DOI: 10.1126/science.1174760.
22. Horiba APOA-370 Operation Manual [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.manualslib.com/manual/745008/Horiba-Apoa-370.html?page=13#manual>
23. Официальный сайт производителя ОПТЭК. Хемилюминесцентный анализатор озона в атмосферном воздухе (3.02 П-А) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.optec.ru/produktsiya.html?c_dept_id=16&c_good_id=15
24. World Data Centre for Greenhouse Gases. Data search. CO2. Tiksi. Observations [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gaw.kishou.go.jp/search/file/0025-2002-1001-01-01-9999>
25. Picarro. G2301 gas concentration analyzer [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.picarro.com/g2301_gas_concentration_analyzer

26. Chris Rella. Accurate Greenhouse Gas Measurements in Humid Gas Streams Using the Picarro G1301 Carbon Dioxide / Methane / Water Vapor Gas Analyzer. Picarro white Paper, 2010.
27. Оценки межгодовой изменчивости концентраций климатически активных газов и потоков энергии на стационарах ААНИИ, а также биогеохимических характеристик в Карском и Лаптевых морях: отчет. – ААНИИ, 2024.
28. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, No. 656. P. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
29. Copernicus Atmosphere Monitoring Service [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets>
30. Agustí-Panareda, A., Massart, S., Chevallier, F., Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Ciais, P., Deutscher, N. M., Engelen, R., Jones, L., Kivi, R., Paris, J.-D., Peuch, V.-H., Sherlock, V., Vermeulen, A. T., Wennberg, P. O., and Wunch, D.: Forecasting global atmospheric CO₂, Atmos. Chem. Phys., 14, 11959–11983, <https://doi.org/10.5194/acp-14-11959-2014>, 2014.
31. Официальная документация к модели ECMWF CAMS [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS%3A+Reanalysis+data+documentation#CAMS:Reanalysisdatadocumentation-KnownissuesCAMSGlobalgreenhousegasreanalysis\(EGG4\)](https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS%3A+Reanalysis+data+documentation#CAMS:Reanalysisdatadocumentation-KnownissuesCAMSGlobalgreenhousegasreanalysis(EGG4))
32. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
33. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of

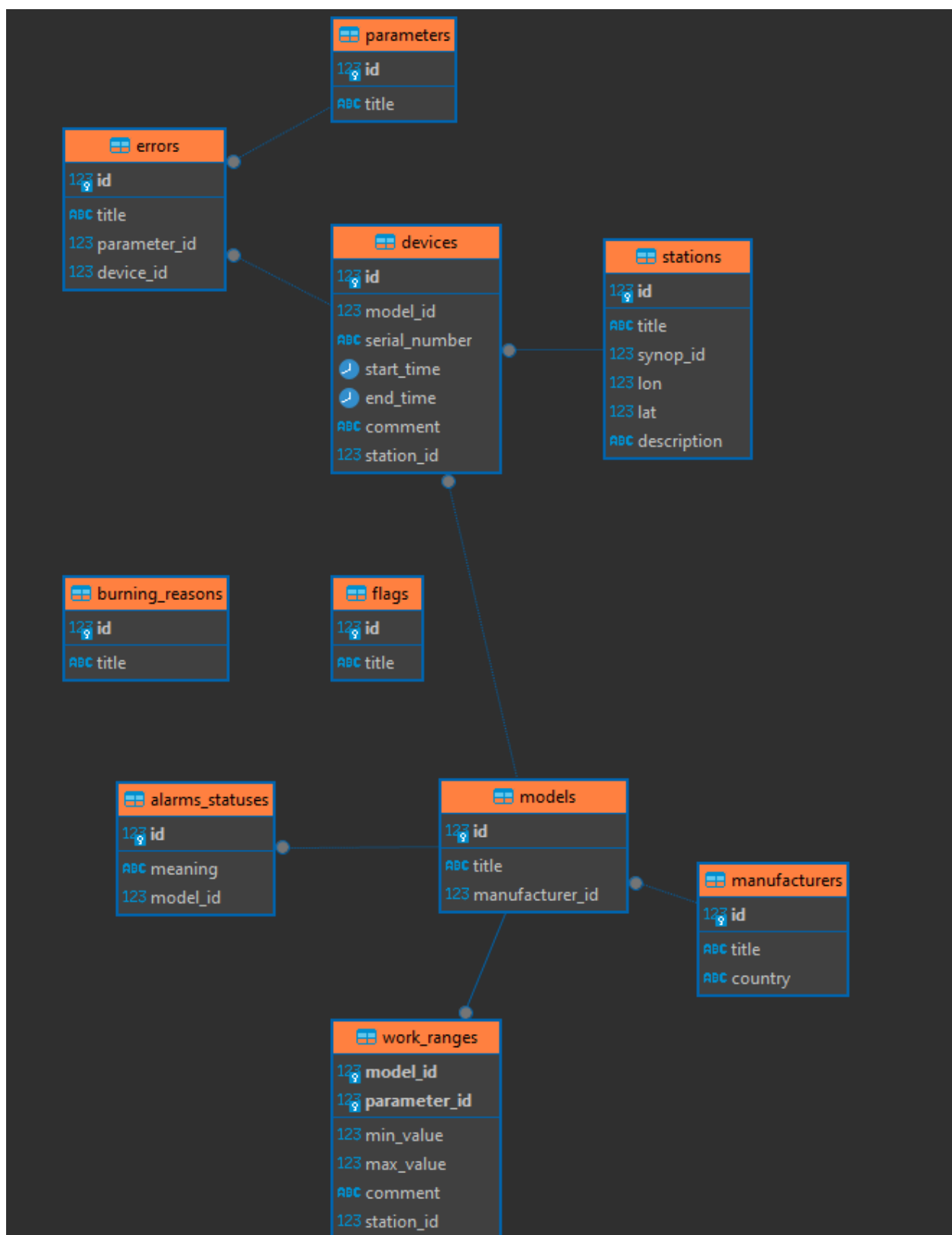
- Climate. 2017. Vol. 30, No. 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
34. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // Journal of the Meteorological Society of Japan. 2015. Vol. 93, No. 1. P. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001.
35. Feng, L., Palmer, P. I., Bösch, H., and Dance, S.: Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman Filter, Atmos. Chem. Phys., 9, 2619–2633, <https://doi.org/10.5194/acp-9-2619-2009>, 2009.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Сокращенная схема базы данных концентраций парниковых газов на стационарах ААНИИ

Схема измерений на примере станции ЛБМБ. Для НЭС «Северный полюс», по понятным причинам, в таблицах измерений помимо даты-времени также содержатся широта и долгота на момент производства измерений или средняя за интервал.



Схема общих данных



ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Расшифровка флагов качества данных

Флаг	Интерпретация
1	Фоновые данные
2	Низкая скорость ветра (< 3 м/с)
3	Сжигание мусора и другое антропогенное воздействие
4	Технические проблемы
5	Калибровка
6	Менее 50% данных (осреднение по флагу 1)
7	Менее 50% данных (осреднение по флагам 2, 3, 4)
8	Менее 50% данных