



Вторые научные чтения памяти Георгия Вадимовича Грузы, ИГКЭ, 12.03.2026

Развитие инструментального мониторинга климатических параметров атмосферы

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А.

НПО «Тайфун»

Введение

□ **Инструментальные методы, главным образом дистанционные**, отличных от тех, которые применяются на сети станций ВМО глобального мониторинга климата, и основанные на них системы наблюдений как наземного, так и космического базирования, получили широкое распространение в мире:

□ **сети наземных станций** мониторинга газового состава атмосферы

□ **NDACC** (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), **119 ст.**,

□ **TCCON** (Total Carbon Column Observing Network), **более 30 ст.**,

□ **COCCON** (COllaborative Carbon Column Observing Network), **более 40 устройств.**

(Buschmann M. et al., Retrieval of xCO₂ from ground-based mid-infrared (NDACC) solar absorption spectra and comparison to TCCON // At-mos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 577–585. doi:10.5194/amt-9-577-2016).

□ **сети лидарные станции**

□ **EARLINET** (European Aerosol Research Lidar Network), **33 ст.**

□ бурно развивающиеся **космические методы** мониторинга климатических параметров и эмиссий парниковых и других радиационно-активных газов, в том числе в России (ИКИ РАН, НИЦ «Планета», СПб госуниверситет и др.)

(Успенский А.Б. и др. Мониторинг основных климатических переменных атмосферы по данным спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2//Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 5-18. DOI: 10.52002/0130-2906-11-5-18)

Введение

❑ *Каково назначение такого мониторинга?*

- ❑ Назначение его, на наш взгляд, в том, чтобы получать **новые**, дополнительные к сетевым **данные о климатических характеристиках атмосферы** для исследования более тонких пространственно-временных вариаций этих характеристик и их связей с различными явлениями и процессами.
- ❑ При этом разрабатываются **новые методы** получения таких данных.
- ❑ Проиллюстрируем это на примере инструментального мониторинга , развиваемого в НПО «Тайфун» на основе совершенствования технологий контактных и дистанционных измерений.

Мониторинг климатических параметров пограничного слоя атмосферы

- ❑ Контактные измерения климатических параметров 300 метрового пограничного слоя атмосферы Центрального региона России проводятся с помощью аппаратуры Высотной метеорологической мачты (ВММ-310).
- ❑ Режим оперативно-климатических наблюдений был введен на ВММ-310 с января 1964 г. Он включал в себя:
 - ❑ круглосуточные измерения температуры и относительной влажности воздуха,
 - ❑ скорости и направления ветра,
 - ❑ атмосферного давления.
- ❑ В разные годы измерения осуществлялись на нескольких атмосферных уровнях: 2(8), 121 и 301 м с различным временным интервалом.

(Сайт ВММ: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html>)



Приборы на высотной мачте:
акустические анемометры и датчик температуры воздуха



Сайт Высотной мачты:
<http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/10-minute.asp>

ФГБУ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "Тайфун" ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ



ВЫСОТНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ МАЧТА

Начало Прогнозы Информация Метеданные Фото Ссылки Контакт

10-минутные средние

Дата 14.02.2019, время 13:33:56

Высота	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Температура, °С	Относительная влажность, %
300 м	06,0	271	-4,8	100,0
217 м	05,2	263	-3,4	*
121 м	05,1	258	*	*
73 м	04,9	268	-2,9	*
25 м	02,7	271	-2,0	76,0
8 м	2,3	270	-1,3	73,3

* - данные временно недоступны по техническим причинам
Следующие параметры измеряются вблизи поверхности:
Давление: 750,2 мм. рт. ст.
Высота барометра над уровнем моря: 189 м
Относительная влажность: 73,3 %

Средние

10-секундные
10-минутные

Графики

Суточные изменения
Недельные изменения
Высотные профили
Приборная панель
Брошюрой годиче всех уровней

Моделирование
Модели перелесо

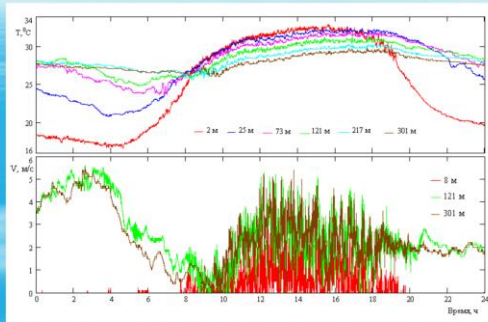
Архив данных
ВММ

2008 год
2009 год

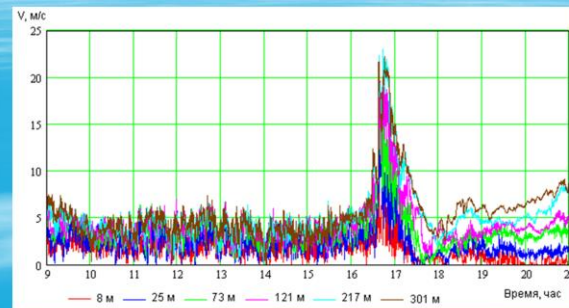
Мониторинг климатических параметров пограничного слоя атмосферы

- Измерительно-вычислительный комплекс ВММ позволяет автоматизировать не только процесс сбора и регистрации данных, но и процесс обработки.
- В настоящее время сформирован **уникальный, не имеющий аналогов в России** электронный массив данных инструментальных измерений характеристик нижнего 300-метрового слоя атмосферы для центрального региона России за 60 лет с минимальным временным разрешением 10 мин.

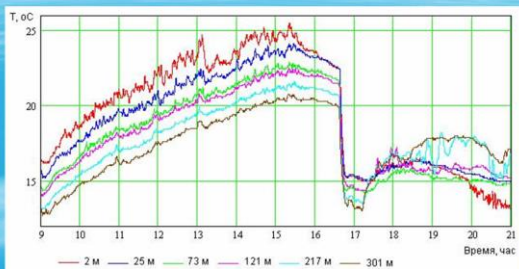
Безоблачный день в антициклоне 21 июня 2021 г.
Типичные изменения температуры и скорости ветра.



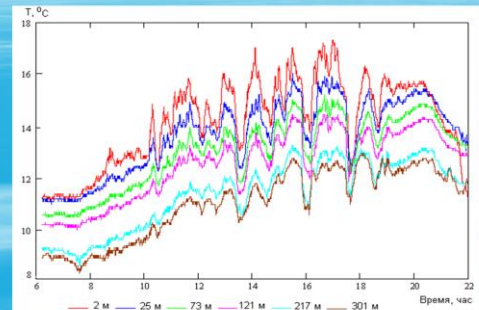
Временной ход скорости ветра 30 апреля 2018 г.
Шквал начался в 16 ч 26 мин, достиг максимума в 16 ч 37 мин.



Прохождение холодного фронта
и мощного кучево-дождевого облака со шквалом 30 апреля 2018 г.
Временной ход температуры воздуха (средние за 10 сек значения).



Временной ход температуры воздуха с 6 до 22 часов
в летний день с ливнями и мощной кучево-дождевой облачностью.
Средние за 10 секунд значения.



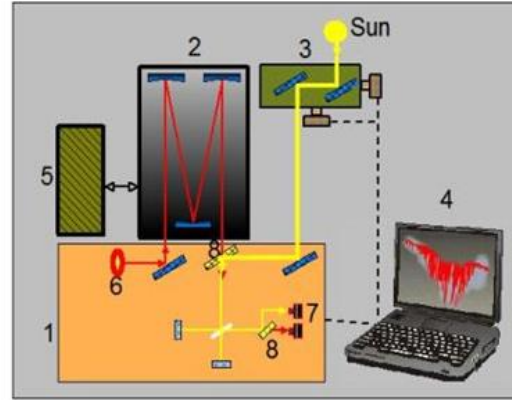
Мониторинг содержания парниковых газов

- ❑ Мониторинг содержания парниковых газов в столбе атмосферы методом молекулярной солнечно-абсорбционной спектроскопии начал развиваться в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ – ныне НПО «Тайфун») с конца 70-х годов прошлого столетия **как альтернатива методу, использующему газоанализаторы с эталонными газовыми смесями.**
- ❑ Метод солнечно-абсорбционной спектроскопии, уступая последнему по точности, для континентальных условий оказывается более эффективным, поскольку при его использовании влияние приземных источников и стоков незначительно.
- ❑ Важно подчеркнуть, что **именно в ИЭМ** метод молекулярной солнечно-абсорбционной спектроскопии, который сейчас широко используется в мире на сетях станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) и TCCON (Total Carbon Column Observing Network), **начал впервые применяться для систематического контроля содержания парниковых газов в толще атмосферы.**

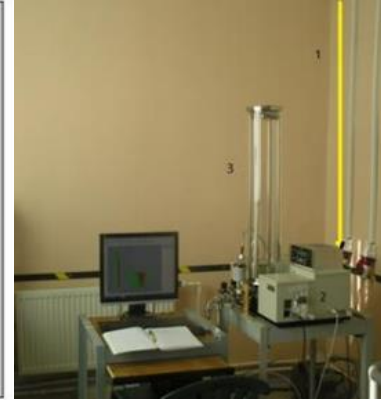
(Нерушев А. Ф., Вишератин К. Н., Коршунов В. А. Климатообразующие факторы и климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)

Газоаналитический комплекс МР-32

- С 2015 года в НПО "Тайфун" начал эксплуатироваться газоаналитический комплекс МР-32 отечественной разработки.
- Измерения одним и тем же методом (*ИК Фурье-спектроскопии*) как интегрального содержания парниковых газов в толще атмосферы по солнцу, так и в приземном слое воздуха без предварительного отбора проб:
 - концентрация в приземном слое CH_4 , CO_2 , N_2O , CO ;
 - общее содержание в столбе атмосферы CH_4 , CO_2 , N_2O , CO , H_2O , O_3 .



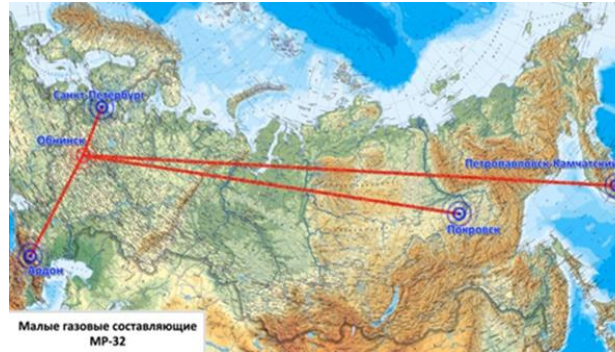
Блок-схема



Общий вид



Следящая сист.

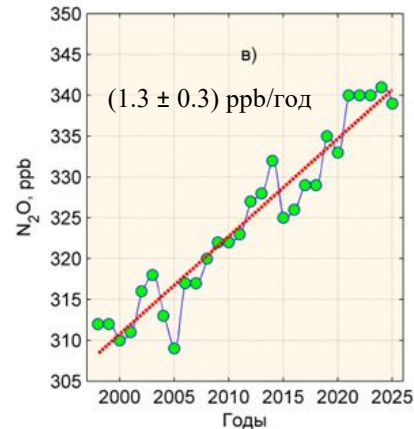
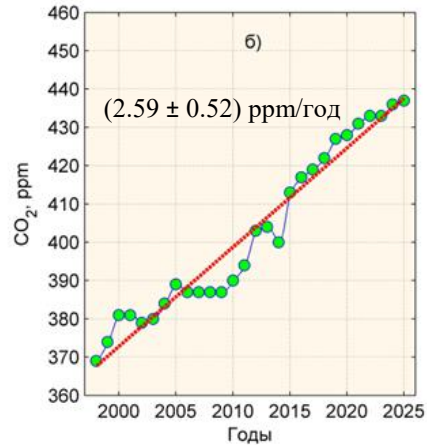
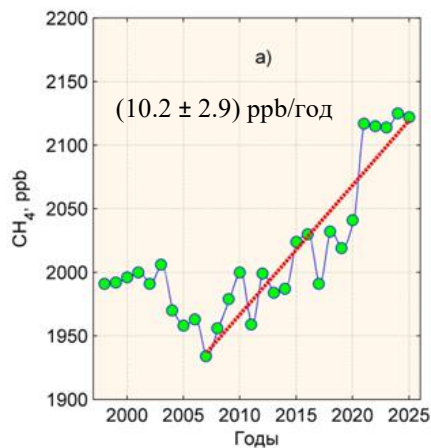


МР-32 размещен на 5-ти станциях (Обнинск, Санкт-Петербург, Ардон, Покровск, Петропавловск-Камчатский) на территории РФ в различных географических зонах.

(Нерушев А. Страницы истории Института экспериментальной метеорологии в воспоминаниях современника. М.: ООО «Маска», 2024. 140 с)

Мониторинг приземных концентраций

- Для расположенной в центре ЕТР станции «Обнинск» общей тенденцией является рост парниковых газов в приземном слое с сезонными минимумами в летний период и максимумами – в зимний.
- В течение суток максимумы концентрации CH_4 и CO_2 наблюдаются обычно в утренние часы.



Динамика многолетней изменчивости средних годовых значений CH_4 (а), CO_2 (б) и N_2O (в) в приземном слое атмосферы на ст. Обнинск

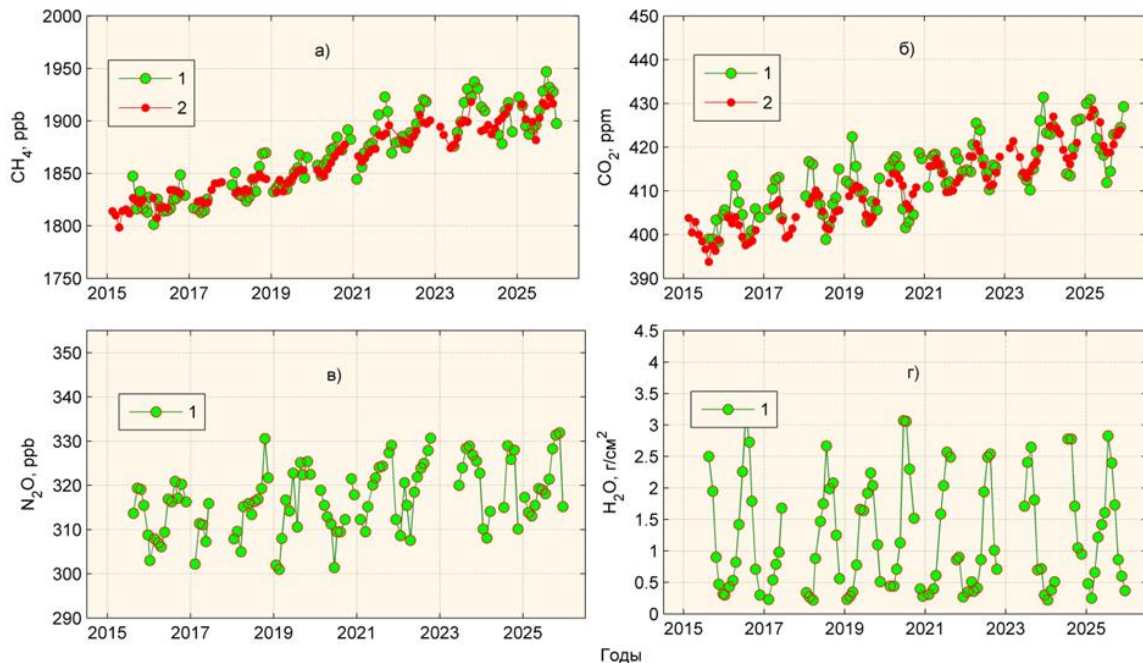
За 27 лет наблюдений

- концентрация метана выросла на 131 ppb,
- углекислого газа на 68 ppm,
- закиси азота на 27 ppb.

В последние 2-3 года отмечается тенденция к замедлению скорости роста приземных концентраций парниковых газов.

(Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. М.: Росгидромет, 2026. 129 с)

Вариации CO_2 , CH_4 , N_2O и H_2O в толще атмосферы



Вариации среднемесячных значений средней по высоте объемной концентрации CH_4 (а), CO_2 (б), N_2O (в) и общего содержания H_2O (г). 1 – Обнинск, 2 – GOSAT

(Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. М.: Росгидромет, 2026. 129 с)

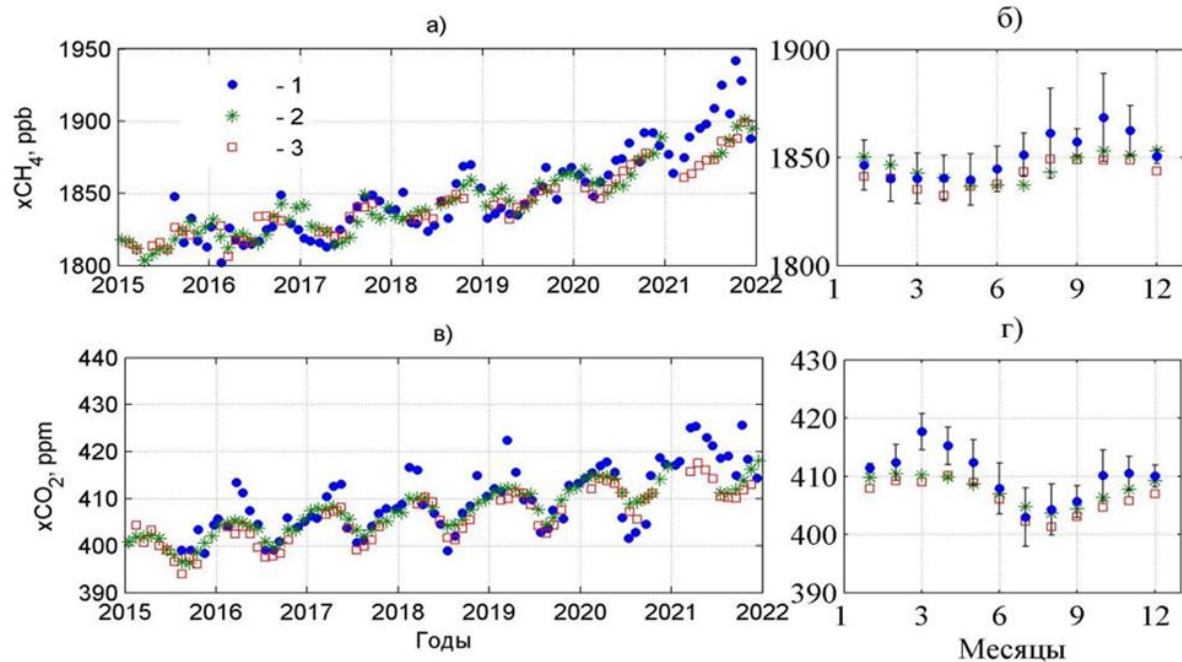
- За весь период наблюдений с 2015 по 2025 гг. значимый положительный тренд среднемесячных концентраций парниковых газов составил:

- CH_4 (10.9 ± 1.2) ppb/год,
- CO_2 (2.0 ± 0.3) ppm/год,
- N_2O (1.0 ± 0.2) ppb/год.

- Небольшой положительный тренд общего содержания водяного пара незначим.

- Тренды по данным GOSAT :
 - CH_4 (10.6 ± 1.0) ppb/год
 - CO_2 (2.4 ± 0.2) ppm/год.

Вариации CO_2 , CH_4 в толще атмосферы (сравнение со ст. TCCON)

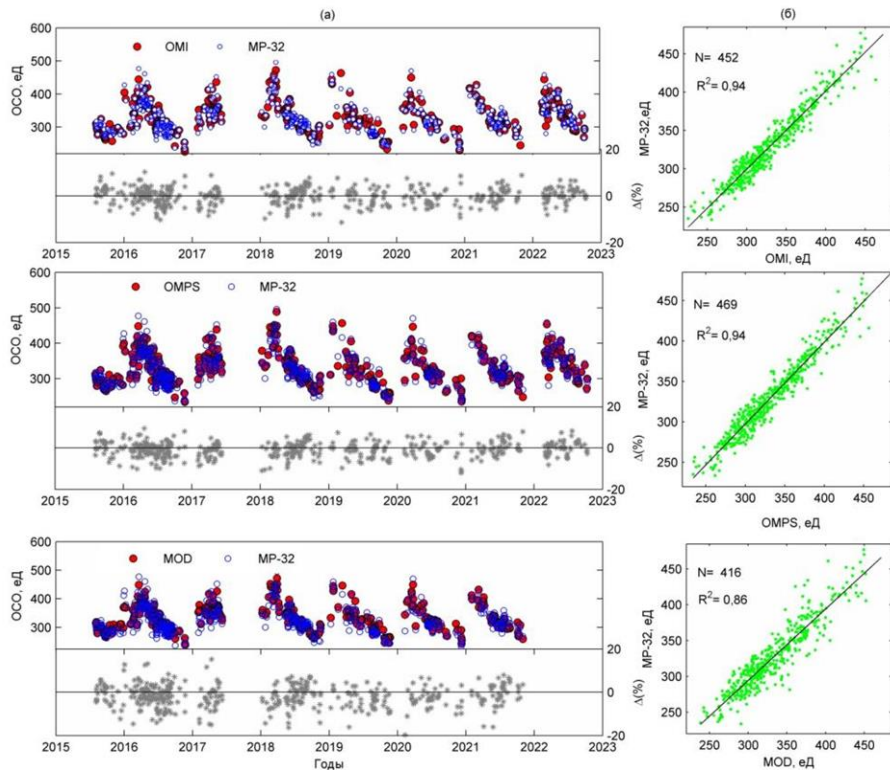


Вариации среднемесячных значений средней по высоте объемной концентрации CH_4 (а), CO_2 (в) и средний сезонный ход (б, г).
1 – Обнинск; 2 – Карлсруэ; 3 – GOSAT (Обнинск, усреднение $5^\circ \times 5^\circ$)

(Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А. Климатообразующие факторы и климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)

- Экстремумы сезонного хода CH_4 и CO_2 по данным ст. Обнинск, GOSAT и ст. Карлсруэ совпадают.
- Амплитуда сезонных вариаций на ст. Обнинск немного выше.
- Результаты измерений на ст. Обнинск хорошо согласуются с наземными наблюдениями на станциях TCCON.
- Коэффициенты корреляции между измерениями на ст. Обнинск и станциях TCCON превышают **0,84 для CH_4** и **0,73 для CO_2** при значимости, превышающей уровень 2σ .

Мониторинг общего содержания озона (ОСО)



Временной ход попарно совпадающих среднедневных ОСО по спутниковым и наземным (MP-32) измерениям: а) – временные ряды и разности Δ (%) между спутниковыми и наземными измерениями; б) – регрессионные зависимости

- Наземные измерения хорошо согласуются с измерениями OMPS (Ozone Mapping and Profiling Suite) и OMI (Ozone Monitoring Instrument).
- Наибольшее рассогласование ($-2,0 \pm 5,5$) % наблюдается со спутниковыми измерениями MOD (Merged Ozone Data).
- **Погрешности определения ОСО прибором MP-32 близки к современным требованиям к качеству измерений ОСО.**

(Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А. Климатообразующие факторы и климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)

Мониторинг стратосферного аэрозоля

- Измерения стратосферного аэрозоля и перистой облачности верхнего яруса (выше 8 км) проводятся в НПО «Тайфун» с помощью разработанного в рамках программы «Геофизика» лидара АК-3.
- Лидар размещен **на 7 станциях** лидарного зондирования Росгидромета, в различных географических зонах России.
- Основная масса измерений выполнена **на базовой лидарной станции в Обнинске**, где регулярные измерения ведутся **с 2012 г.**



Лидар АК-3

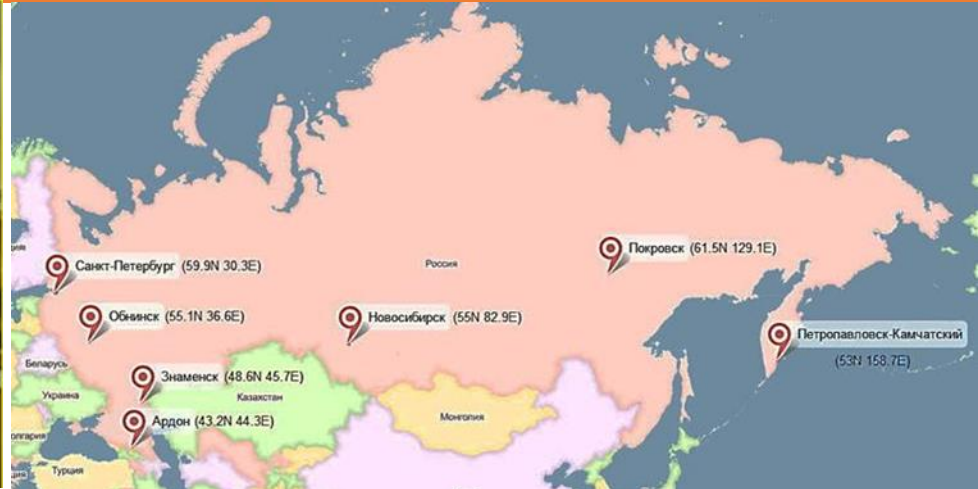
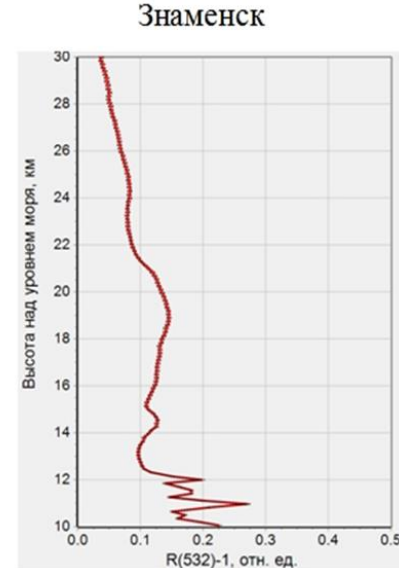
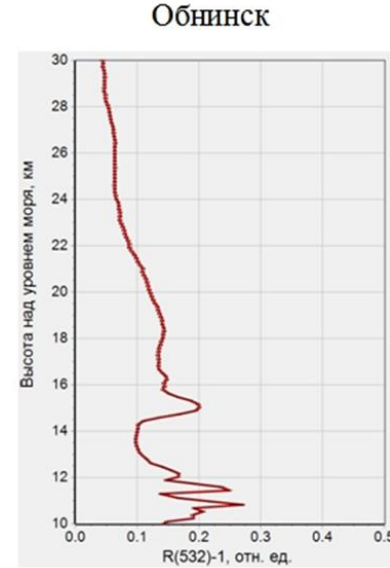
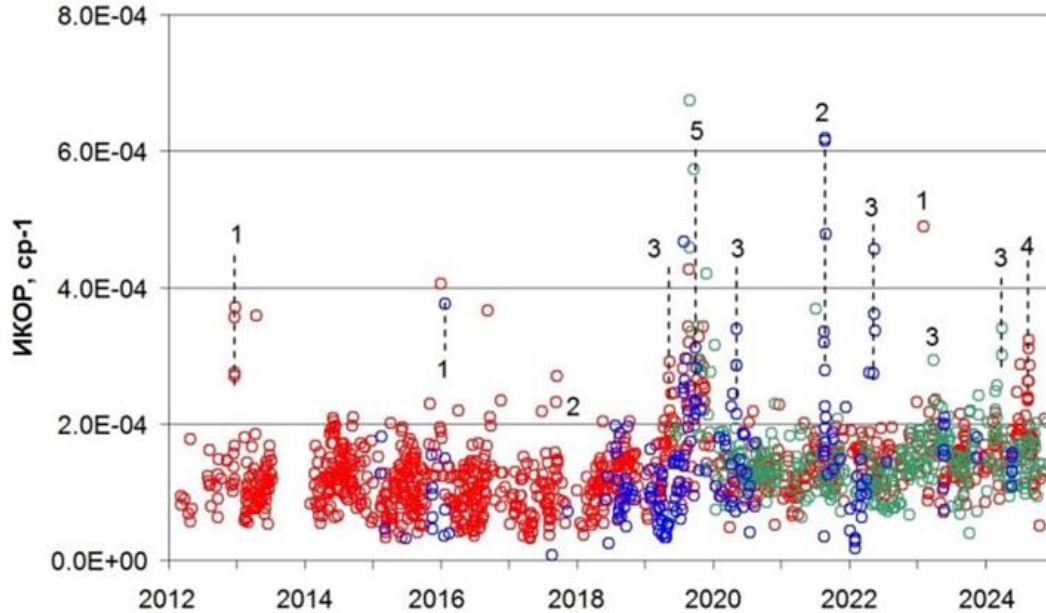


Схема расположения станций лидарного зондирования

- Лидарные измерения характеристик атмосферного аэрозоля на высотах **от 10 до 70 км** проводятся **в темное время суток в условиях безоблачной атмосферы.**
- Непосредственно измеряемой величиной является коэффициент обратного аэрозольного рассеяния [км-1ср-1]. Интегральная по высоте величина коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (ИКОР) **служит мерой аэрозольного наполнения стратосферы.**

(Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А. Климатообразующие факторы и климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)

Мониторинг стратосферного аэрозоля



Временной ход ИКОР в слое 15 - 30 км с использованием данных трех лидарных станций с наибольшим числом измерений: Обнинск – красные точки, Новосибирск – синие, Знаменск – зеленые.

1–ПСО; 2–АПП; 3 – аэрозоль в апреле-мае; 4 – аэрозоль во время блокирующего антициклона; 5 – вулкан Райкоке (Курильские о-ва).

(Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А. Климатообразующие факторы и

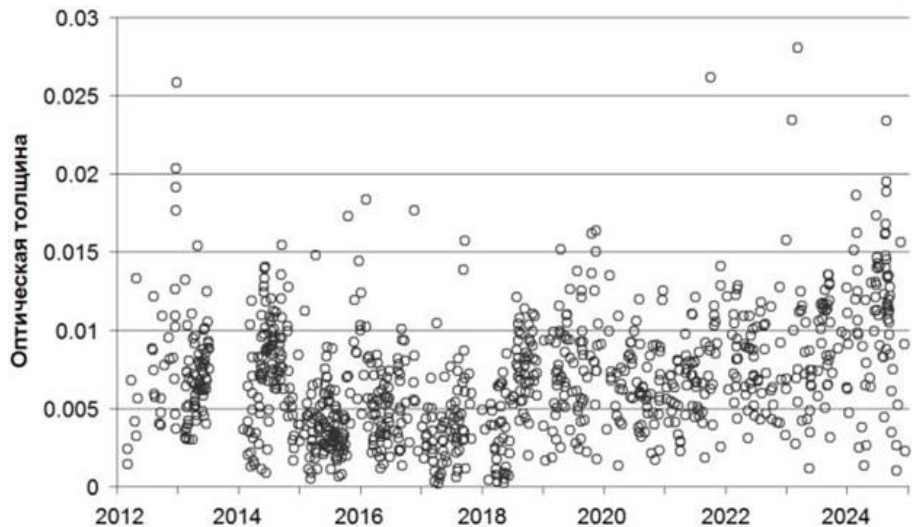
климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)

Средние за 2025 г. высотные профили отношения коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния в Обнинске и Знаменске.

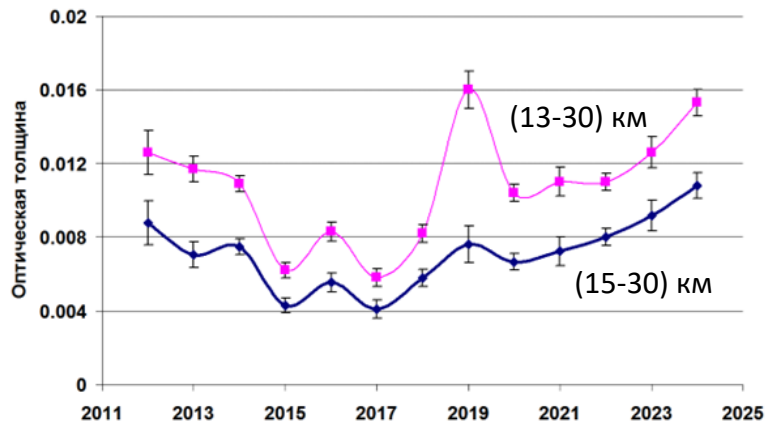
- 16-22 км – слой Юнга.
- 10-12 км – слои повышенного обратного рассеяния (как правило, перистые облака).

Мониторинг стратосферного аэрозоля

Основным климатообразующим фактором стратосферного аэрозоля является его оптическая толщина. Она оценивается по измерениям ИКОР с использованием оптической модели стратосферного аэрозоля.



Временной ход оптической толщины аэрозоля в слое от 15 до 30 км по данным измерений в Обнинске



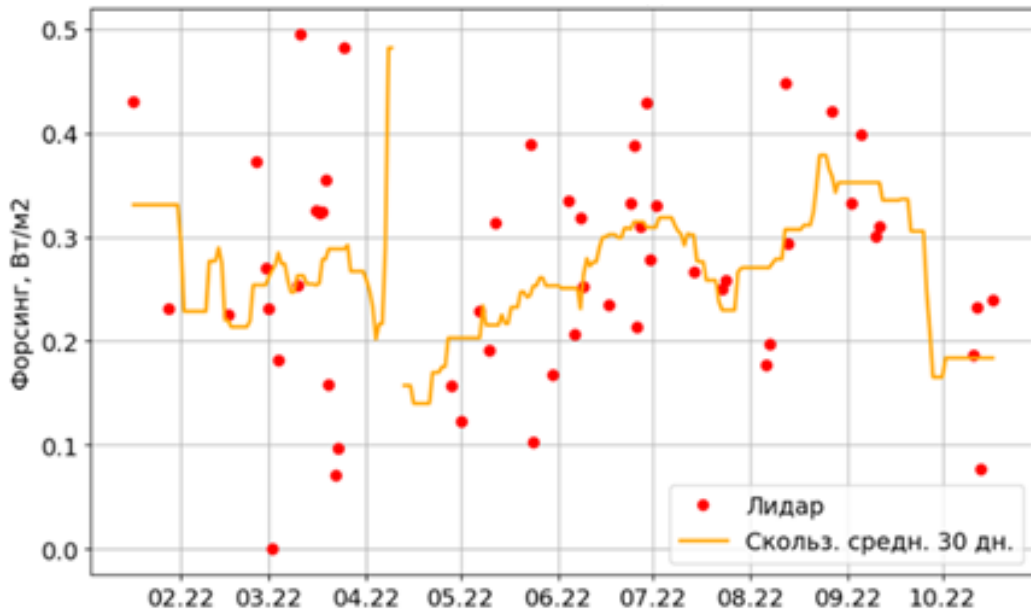
Изменение среднегодовых значений оптической толщины стратосферного аэрозоля в слое от 13 до 30 км и от 15 до 30 км.

$\langle \tau \rangle = 0.0068$ (15-30 км), $\langle \tau \rangle = 0.010$ (13-30 км).

(Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Коршунов В.А. Климатообразующие факторы и климатические характеристики по данным дистанционных измерений. Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия». 2025. 302 с)¹⁴

Мониторинг стратосферного аэрозоля

- ❑ Количественно влияние аэрозоля на климат определяется величиной **радиационного форсинга**, который равен разности потока радиации с учетом присутствия аэрозоля и без него.
- ❑ Величина радиационного форсинга (R) пропорциональна оптической толщине стратосферного аэрозоля τ . Справедливо приближенное равенство $R = -28 \tau$.

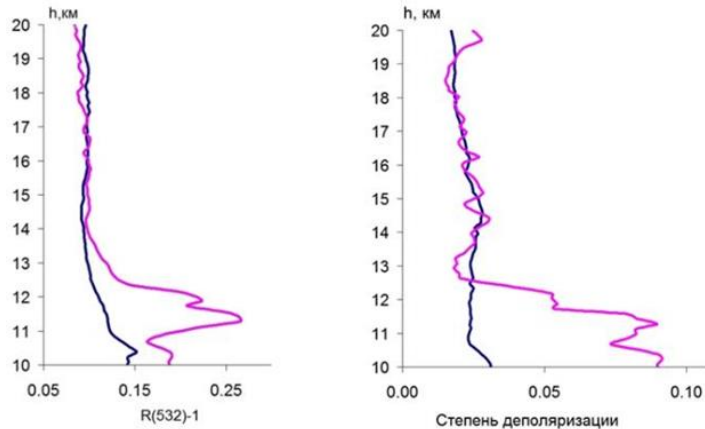


Временной ход радиационного форсинга стратосферного аэрозоля в слое от 13 до 30 км по данным измерений в 2022 г.

Среднее значение для фонового стратосферного аэрозоля: $-0,28 \text{ Вт/м}^2$

Мониторинг стратосферного аэрозоля

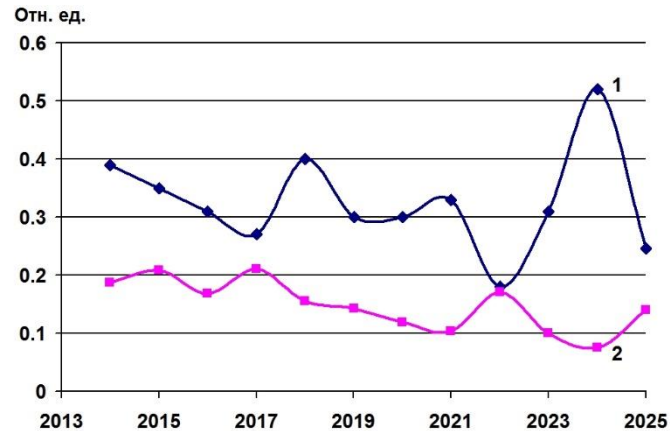
Аэрозоль природных пожаров (АПП)



Средние высотные профили параметра R(532)-1 и степени деполяризации для профилей сферического (синие линии) и смешанного (фиолетовые линии) типов

Средние оценки радиационного форсинга для АПП:
–(0.033-0.054) Вт/м² на уровне ВГА,
–(0.079-0.19) Вт/м² на уровне ТПП.
При среднегодовом значении $\tau=0.0022$
изменение приземной температуры $\Delta T = -0.018$ К

Перистые облака (ПО)



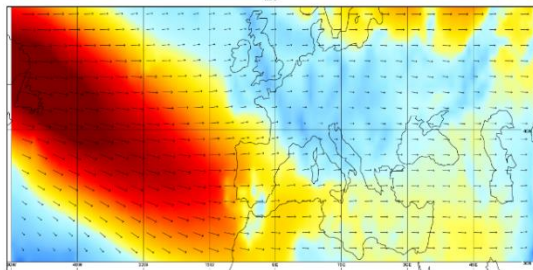
Вероятность появления (1) и средняя оптическая толщина (2) перистых облаков

При среднем значении $\langle \tau \rangle = 0.16$ и вероятности наблюдения ПО = 0.33 среднегодовой положительный радиационный форсинг ПО на верхней границе атмосферы:
7.9 Вт/м² в ночное время и 1.8 Вт/м² в дневное время

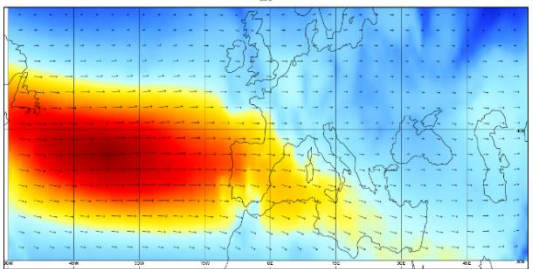
Мониторинг ветра в свободной атмосфере

Систематическое исследование характеристик поля ветра в свободной атмосфере проводилось по данным зондирования Земли радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat 8-Meteosat 11

Средние значения, зима, период 2007-2016
м/с



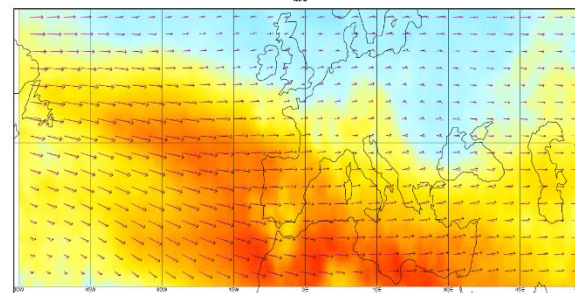
Средние значения, лето, период 2007-2016
м/с



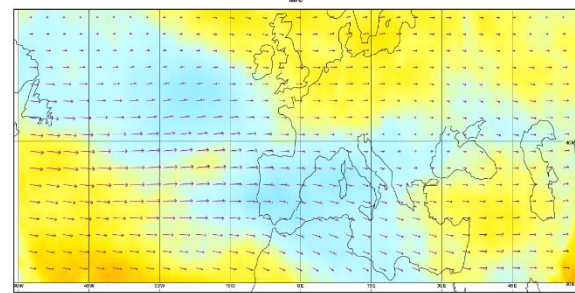
Средние многолетние значения скорости и направления ветра для зимы и лета

Аномалии модуля и направления вектора скорости ветра для зимы и лета 2020 г.

Разница между зимой 2020 и средней зимой (за 2007-2016)
м/с

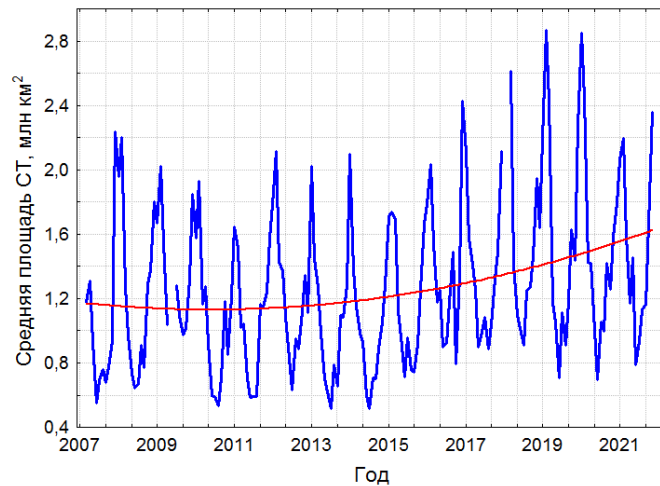
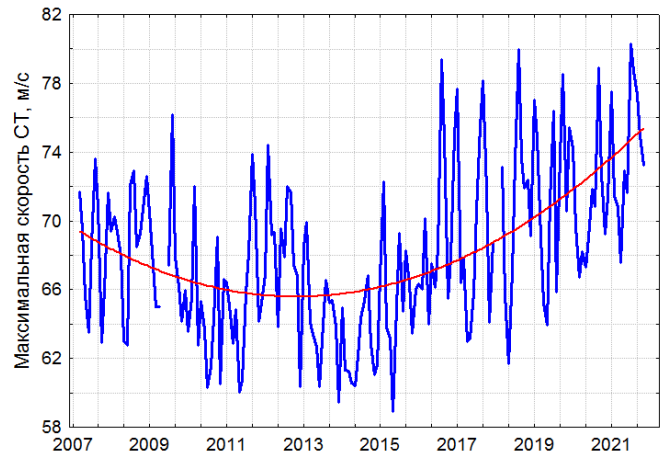


Разница между летом 2020 и средним летом (за 2007-2016)
м/с

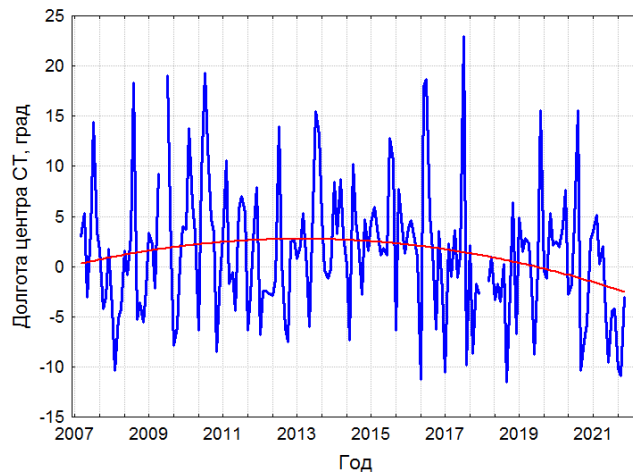
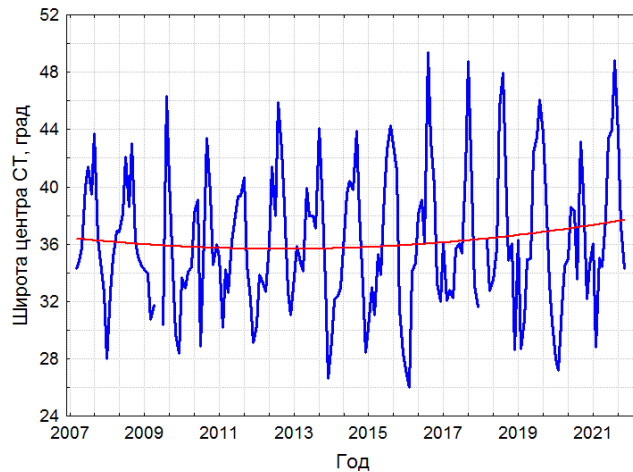


разница модулей скорости ветра
-20.0 -12.0 -4.0 4.0 12.0 20.0 30.0

Пространственно-временная изменчивость х-к СТ

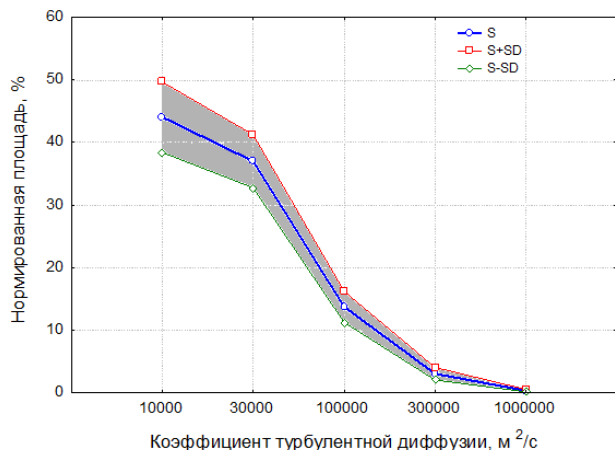


Заметный рост V_m и S с 2013-2015 гг.

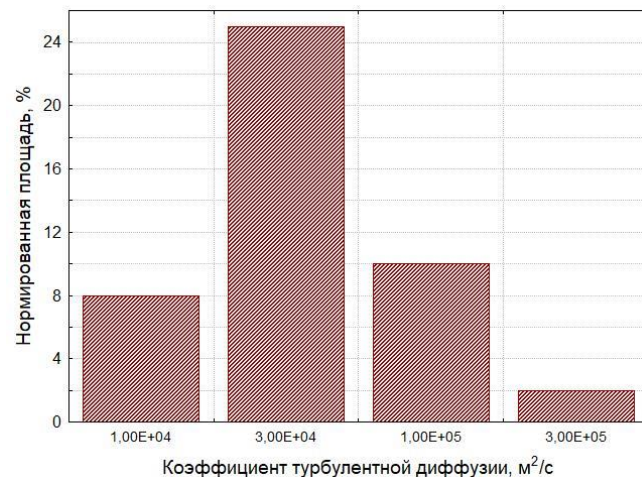


- Начиная с 2013-2015 гг. наблюдается смещение центра СТ к полюсу и на запад.
- Это связано, по-видимому, с таянием арктического морского льда и повышением температуры тропосферы в высоких широтах

Характеристики зон турбулентности в верхней тропосфере



Распределение средних за период 2007-2018 гг. величин нормированных площадей в видимой со спутника области по диапазонам изменения K_d

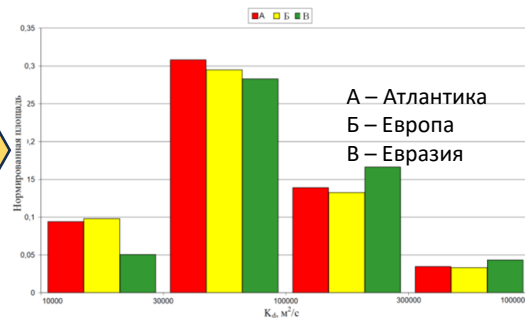


Величина средней на временном промежутке 2007–2018 гг. площади видимой со спутника области Северного полушария, занятой турбулентностью с различными значениями K_d

Градации турбулентности:

Слабая: $3 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с} > K_d \geq 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$,
Умеренная: $10^5 \text{ м}^2/\text{с} > K_d \geq 3 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$,
Сильная: $3 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{с} > K_d \geq 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$,
Оч. сильная: $10^6 \text{ м}^2/\text{с} > K_d \geq 3 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Распределение средних за период 2007-2018 гг. величин нормированных площадей в выделенных областях по диапазонам изменения K_d



Динамика площади зон турбулентности (2007-2018)

Слабая: ↑ в 2 раза
Умеренная: ↑ на 50%
Сильная: ↓ на 6%
Оч. сильная: ↓ на 33%

Пути развития инструментального мониторинга климатических параметров атмосферы

- По нашему глубокому убеждению дальнейшее развитие инструментального мониторинга климатических параметров атмосферы в РФ в ближайшей и среднесрочной перспективе должно основываться **на отечественной базе научного приборостроения.**
- **Мониторинг парниковых газов будет развиваться, с нашей точки зрения, по следующим направлениям.**
 - *По пути модернизации как приборной базы, так и программного обеспечения, что позволит расширить номенклатуру определяемых газовых компонентов.*
 - *Путем расширения сети станций инструментального мониторинга парниковых газов, а также углубленного изучения влияния различных природных и антропогенных факторов и оценки их вклада в пространственно-временные вариации парниковых газов.*
 - *По пути развития методов контроля эмиссий парниковых газов на урбанизированных территориях.*

Пути развития инструментального мониторинга климатических параметров атмосферы

- Развитие мониторинга стратосферного аэрозоля связано
 - *с модернизацией лидаров типа АК-3 для обеспечения их работы в режиме удаленного доступа без присутствия оператора*
 - *и расширением лидарной сети Росгидромета.*
- Развитие мониторинга ветра в свободной атмосфере над всей территорией РФ на основе спутниковой информации связано
 - *с использованием данных российских геостационарных метеорологических спутников второго и последующих поколений*
 - *и спутников гидрометеорологической космической системы «Арктика-М».*
- Развитие мониторинга климатических параметров пограничного слоя атмосферы будет идти главным образом по пути углубленного исследования связи изменчивости параметров с крупномасштабными атмосферными процессами и опасными атмосферными явлениями.

Спасибо за внимание !