



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Анализ условий формирования песчаных бурь с использованием
спутниковой съёмки»

Исполнитель Табанина Диана Артёмовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

« 9 » июня 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Список принятых сокращений

AERONET — Глобальная сеть наземных солнечных фотометров для калибровки и верификации спутниковых AOD.

AOD — Аэрозольная оптическая толщина – безразмерная мера ослабления солнечного излучения частицами в столбе атмосферы.

AVIRIS / AVIRIS-NG — Авиационный гиперспектральный сенсор NASA (400–2500 нм, 2100 каналов).

BSC-DREAM8b — Региональная модель пылевого переноса (Barcelona Supercomputing Center).

CALIOP — Лидар на спутнике CALIPSO (длины волн 532 нм и 1064 нм, поляризационный канал).

CALIPSO — Спутник NASA/CNES с лидаром для вертикального профилирования аэрозолей и облаков.

CCN — Ядра конденсации облаков – частицы (0,01–1 мкм), на которых конденсируется водяной пар, образуя облачные капли.

Dust RGB — Многоспектральный композит (IR8.7, IR10.8, IR12.0), в котором пыль окрашивается в розово-пурпурный цвет.

EMIT — Гиперспектральный сенсор на МКС (2022 г.) для картирования минерального состава пылевых источников.

EnMAP — Гиперспектральный спутник Германии (DLR, 2022 г.).

EPORT / EUMETRAIN — Образовательный портал EUMETSAT с инструментом визуализации ePort (доступ к снимкам MSG, VIIRS).

ERA5 — Пятое поколение реанализа ECMWF (с 1940 г., высокое пространственно-временное разрешение).

GDAS — Глобальная система ассимиляции данных NOAA

GES DISC — Центр хранения данных NASA Goddard (MERRA-2, OMI, AIRS).

GFS — Глобальная модель прогноза погоды NOAA.

GIOVANNI — Интерактивный сервис NASA GES DISC для визуализации и загрузки спутниковых и реаналитических данных (AOD, UV AI, TDD).

GOCART — Глобальная модель переноса аэрозолей (часть системы GOCART).

HYSPLIT — Модель NOAA для расчёта траекторий переноса воздушных масс (прямые и обратные).

Hyperion — Гиперспектральный сенсор на EO-1 (2000–2017 гг.), первые детальные съёмки впадины Боделе.

IFS — Глобальная модель прогноза ECMWF.

INP — Ядра льдообразования – частицы, инициирующие замерзание переохлаждённой воды в облаках (особенно эффективна минеральная пыль).

IR — Инфракрасный диапазон (тепловой) – работает днём и ночью, позволяет оценивать температуру вершин облаков и поверхности.

LLJ — Низкоуровневое струйное течение – устойчивый поток с повышенной скоростью (≥ 12 м/с) в нижних 1–2 км атмосферы. Главный механизм выноса пыли в Боделе.

LSU — Линейное спектральное разделение – метод определения доли различных минералов в пикселе гиперспектрального снимка.

MERRA-2 — Второе поколение реанализа NASA – адаптирован для пустынных регионов (алгоритм Deep Blue).

METAR — Авиационная метеосводка (обычно каждый час).

MOCAGE — Глобальная модель химии и переноса аэрозолей (Météo-France).

MODIS — Спектрорадиометр на спутниках Terra/Aqua (36 каналов, 250–1000 м). Широко используется для мониторинга AOD и пылевых шлейфов.

MSG — Серия геостационарных метеорологических спутников EUMETSAT (с 2004 г.).

NAAPS — Глобальная модель переноса аэрозолей (US Navy).

NCEP — Центры прогнозирования окружающей среды США.

NMMB/BSC-Dust — Региональная модель пылевого переноса (BSC).

NOGAPS — Глобальная модель атмосферы (US Navy).

OMI — Прибор на спутнике Aura (UV–VIS) – даёт аэрозольный индекс (UV AI).

OSL — Метод датирования осадочных пород по последнему воздействию солнечного света на минеральные зёрна.

PM10 / PM2.5 — Мелкодисперсные частицы диаметром менее 10 и 2.5 мкм; PM2.5 способны проникать в альвеолы и кровоток.

PRISMA — Гиперспектральный спутник Итальянского космического агентства (30 м разрешение).

RP5 / rp5.ru — Архив метеорологических данных (SYNOP/METAR) по всему миру.

SAR — Радар с синтезированной апертурой – используется для картографирования поверхности и деформаций.

SEVIRI — Основной прибор на MSG – 11 узкополосных каналов (VIS, IR, WV) + один канал высокого разрешения (HRV).

SKIRON — Региональная модель пылевого переноса (Афинский университет).

SYNOP — Сводка наземных метеорологических наблюдений (каждые 3 или 6 часов).

TDD — Суммарное осаждение пыли – масса пыли, выпавшей на единицу площади за единицу времени ($\text{кг}/\text{м}^2/\text{с}$).

TOMS — Прибор (Nimbus-7, Earth Probe) – исторический источник аэрозольного индекса.

True Color — Композит натуральных цветов – имитация цветного фото (каналы VIS 0.65, 0.55, 0.47 мкм).

UV AI — Ультрафиолетовый аэрозольный индекс – параметр спутников OMI/TOMS, чувствительный к поглощающим аэрозолям (пыль, сажа).

VIIRS — Прибор на спутниках Suomi NPP, NOAA-20, NOAA-21 – преемник MODIS (22 канала, 375–750 нм).

VIS — Видимый диапазон (0.4–0.7 мкм) – снимки только в светлое время суток, высокое разрешение.

VV — Горизонтальная видимость — максимальное расстояние, на котором объект различим невооружённым глазом (км).

WorldView — Веб-инструмент NASA для доступа к снимкам MODIS, VIIRS, Sentinel.

WW — Код текущей погоды в формате SYNOP (например, песчаная буря).

ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения (нормативы PM, статистика смертности).

Диатомит — Биогенная осадочная порода, сложенная аморфным кремнезёмом (панцирями диатомовых водорослей). Отличается малой плотностью (0.8 г/см^3) и хрупкостью.

МГС — Малые газовые составляющие (O_3 , NO_x , SO_2 , CH_4 , CO_2 и др.) — участвуют в образовании вторичных аэрозолей.

мм — Миллиметр — единица измерения осадков (годовая сумма) и толщины слоя пылевых отложений.

м/с — Метр в секунду — единица измерения скорости ветра.

нм — Нанометр ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) — единица измерения длины волны электромагнитного излучения (например, 550 нм — зелёный свет).

ФАО (FAO) — Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций.

ХОБЛ(COPD) — Хроническая обструктивная болезнь лёгких — обостряется при вдыхании пыли.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	2
ОГЛАВЛЕНИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 Теоретические основы физики атмосферных аэрозолей и пылевых выносов. География изучаемого региона	12
1.1 Аэрозоли и физика атмосферы	12
1.1.1 Определение и классификация аэрозолей (природные и антропогенные источники).....	12
1.1.2 Прямое радиационное воздействие: рассеяние и поглощение солнечного и земного излучения	13
1.1.3 Косвенное воздействие: роль аэрозолей как ядер конденсации (CCN) и ядер льдообразования (INP).....	14
1.1.4 Неопределённости в климатических моделях, связанные с аэрозольным фактором.....	15
1.2 Влияние пылевых выносов на жизнедеятельность человека.....	16
1.2.1 Влияние пылевых выносов на деятельность и здоровье человека	17
1.2.2 Влияние пыльных бурь на сельское хозяйство.....	18
1.2.3 Влияние пылевых выносов на авиацию	18
1.2.4 Влияние пылевых выносов на другие природообразующие факторы ...	19
1.3 Общие механизмы пылеобразования	20
1.3.1 Общие механизмы пылеобразования и выноса при песчаных бурях и низовых метелях. Определение, виды, условия формирования песчаных бурь	20
1.3.2 Ветровой режим: эффект «природного ветрового тоннеля».....	22

1.3.3 Пороговые условия эмиссии пыли.....	24
1.4 География распределения пылевых источников.....	25
1.4.1 Географическое образование региона	26
1.4.2 Физико-географическая характеристика региона	27
1.4.3 Географическое положение впадины Боделе	28
1.4.4 Геоморфологическая характеристика и подстилающая поверхность .	29
1.4.5 Специфика субстрата: диатомиты и их свойства	31
1.4.6 Климатические условия Республика Чад	33
1.4.7 Климатологическое положение впадины Боделе	34
1.4.8 Сезонная и суточная изменчивость выносов	37
2 Выбор и обоснование методов анализа пылевых выносов	41
2.1 Методы мониторинга пылевых выносов	41
2.1.1 Пассивные спутниковые методы.....	41
2.1.2 Активные спутниковые методы (лидарные).....	42
2.1.3 Гиперспектральные методы.....	43
2.1.4 Методы синоптического анализа и реанализа	44
2.1.5 Методы моделирования траекторий переноса.....	45
2.2 Обоснование выбора данных и методов	46
2.2.1 Метеостанция Файя-Ларжо	47
2.2.2 Реанализ MERRA-2, сервис GIOVANNI	47
2.2.3 Поля ветра и синоптика.....	48
2.2.4 Использование данных с WorldView	48
2.2.5 Спутниковый анализ EUMETRAIN / ePort (VIS/IR)	48
2.2.6 Ограничения использованных методов	49

3 Использование данных спутниковых снимков при выявлении пылевых выносов в районе впадины Боделе	51
3.1 Оценка верификационных данных со станции Файя-Ларджо и климатологические закономерности	56
3.1.1 Пылевые случаи и видимость	56
3.1.2 Направление и сила ветра	58
3.1.3 WW	61
3.1.3 UV	61
3.1.4 Длина шлейфа	63
3.1.5 AOT/AOD	66
3.1.6 Низкоструйное течение (LLJ)	67
3.2 Анализ типовых синоптических ситуаций	68
3.2.1 Прохождение классического зимний ветра – Харматтана	69
3.2.2 Прохождение холодного фронта и появление волн Кельвина	69
3.2.3 Летняя конвективная ситуация (влияние хабуба)	70
3.2.4 Промежуточные заключения по синоптическим ситуациям	73
3.2.5 Значения AOD как результирующего элемента для сравнения синоптических ситуаций	74
3.3 Индексы UV, AOD, AOD с коррекцией. Использование данных реанализа MERRA-2 для количественной оценки пылевых выносов в районе впадины Боделе	74
3.3.1 UV index	76
3.3.2 AOT/AOD	78
3.3.3 Набор данных для рассмотрения индекса AOT	79
3.3.4 Рассмотрение климатологических показателей	80

3.3.5 Алгоритм преобразования климатологического архива.....	81
3.3.6 Сравнение снятых вручную АОТ и посчитанных компьютером АОД81	
3.3.7 Алгоритм коррекции АОТ	82
3.3.8 Метрики, полученные по результатам сравнения скорректированного АОТ и данных реанализа АОД.....	82
3.3.9 Сравнительный анализ полученных результатов.....	83
3.3.10 Качественное и качественная оценка типа аэрозоля и протяженность пылевых шлейфов.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	89
Список использованной литературы.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	98
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	99
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	101
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	104
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	105

ВВЕДЕНИЕ

Песчаные бури в различные периоды различаются по частоте и интенсивности, они имеют выраженный сезонный характер и могут значительно меняться от года к году, что делает актуальным изучение механизмов их формирования, пространственно-временной динамики и методов мониторинга.

Актуальность работы обусловлена необходимостью уточнения роли минеральной пыли как одного из ключевых природных аэрозолей, влияющих на радиационный баланс, облакообразование и климатические процессы в глобальном и региональном масштабах. Особый интерес представляет впадина Боделе в Республике Чад – крупнейший источник пыли на планете, чей вклад в глобальную эмиссию аэрозолей остаётся недостаточно изученным с использованием современных методов дистанционного зондирования.

Цель выпускной квалификационной работы – анализ пылевых выносов из впадины Боделе по данным дистанционного спутникового зондирования, картам реанализа и синоптическим материалам.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Обобщить теоретические сведения об атмосферных аэрозолях, механизмах пылеобразования и методах их дистанционного мониторинга.
2. Дать природно-климатическую характеристику региона исследования и обосновать выбор спутниковых данных для анализа.
3. Выявить типовые синоптические ситуации, сопровождающие пылевые выносы из впадины Боделе, и оценить количественные характеристики выносов (аэрозольная оптическая толщина, дальность переноса, вертикальное распределение).

Объект исследования – атмосферные пылевые выносы из впадины Боделе (Республика Чад).

Предмет исследования – пространственно-временные характеристики пылевых выносов, их связь с метеорологическими условиями и возможность дистанционного мониторинга.

ВКР состоит из: введения, трёх разделов, заключения, списка литературы и приложений. В первом разделе представлена общая информация: глобальная значимость аэрозолей, физические процессы пылевых выносов, обзор региона изучения. Второй раздел посвящен специфике методов изучения пылевых выносов и обоснование выбора этих методов для работы. Третий раздел содержит аналитическую часть работы, где предложен комплекс способов дистанционного определения состояния песчаной обстановки в регионе посредством подготовки данных реанализа с помощью разработки продукта в среде Python и последующей разработкой выводов, дешифрирования космических снимков и анализ синоптических положений.

Общие выводы по результатам исследования приведены в заключении работы.

1 Теоретические основы физики атмосферных аэрозолей и пылевых выносов. География изучаемого региона

1.1 Аэрозоли и физика атмосферы

1.1.1 Определение и классификация аэрозолей (природные и антропогенные источники)

Атмосферный аэрозоль – система малых жидких и твёрдых частиц, взвешенных в газообразной среде. Они образуют микропримесь с малой долей массовой концентрации от 1 мкг/м³ до 1 мг/м³. Атмосферный аэрозоль один из составляющих системы климатического равновесия, его воздействие значимо для формирования процессов неотделимых от существования жизни на планете. Несмотря на полезную составляющую, аэрозоль в общем понимании может представлять и потенциальную угрозу жизни и здоровью человека. Аэрозоль может не просто играть роль компонента или поллютанта, так, в содействии с некоторыми метеорологическими условиями дисперсные частицы могут причинять случаи катастрофического характера.

Если рассматривать атмосферу, то в первую очередь становится очевидна её особенность – пространственную мобильность. Атмосфера по сравнению с другими компонентами природной среды наиболее подвержена всесторонним воздействиям и влияниям, это касается и аэрозольной составляющей.

Аэрозоли могут иметь характеристики довольно обширных пределов, поэтому принято несколько типов классификаций: по агрегатному состоянию частиц, по природе образования, по способу образования аэрозольных частиц. Есть также исторически сформировавшиеся понятия об аэрозоле, это дисперсные образования следующих типов: пыль, вторичные аэрозоли, органические аэрозоли, туман или дымка, облака, дым, смог. [13]

Классификация по природе образования различает естественные источники и искусственные. Естественные источники представляют активизацию сил природы, например, при ветровой эрозии или при вулканических извержениях. Искусственные источники – ничто иное, как итог

хозяйственной деятельности человека. Такая деятельность чаще всего представляется в виде продуктов газофазных реакций МГС. [13]

В данной работе будет рассмотрен такой атмосферный аэрозоль, как песок. Минеральный аэрозоль почвенно-эрозийного происхождения считается одним из важнейших компонентов атмосферы. Песок – минеральный аэрозоль, переносимый ветром. Песок, в первую очередь, - грубодисперсный аэрозоль с размерами от 5 мкм до 10 мкм и более, образуемый при условиях механического разрушения породы или пересыпаний песка из одного какого-то места под действием сил ветра. Размер частицы песка влияет и на продолжительность нахождения взвеси в воздухе, поэтому о характере источника будет сказано далее.

1.1.2 Прямое радиационное воздействие: рассеяние и поглощение солнечного и земного излучения

Аэрозольный след сказывается на радиационном балансе всей атмосферы; мы принимаем во внимание, что и водяной пар тоже аэрозоль. В основном своём действии аэрозоли охлаждают атмосферу и рассеивают солнечное излучение обратно в космическое пространство. Радиационный баланс – алгебраическая сумма прихода и расхода потоков солнечной активности при процессах поглощения и излучения; разница между поглощенной солнечной энергии и уходящим длинноволновым излучением (измеряется в КВт/кв. м/мин). В прямом своём действии аэрозоли нарушают этот баланс (при охлаждении): охлаждение предотвращает «парниковый эффект», который необходим для поддержания жизни на планете; задерживающий слой, препятствующий выходу тепла в космос.

Аэрозольный поток при интенсивном перемешивании в нижних слоях атмосферы, зачастую при пыльных бурях, изменяет микрофизический состав слоя. Состав изменяется таким образом, что происходят перестроения в спектральном излучении, получаемом притоком солнечной активности. До 30% в среднем при действии песчаного аэрозоля уменьшается поток инсоляции, что

значительно снижает дневную температуру у земли. [13] Ночью, напротив, длинноволновое излучение задерживается из-за наличия песчаной взвеси в воздухе, что приводит к увеличению температуры у поверхности в вечерние и ночные часы, что противоречит естественному ходу температур. Например, такое снижение температуры и спектрального состава солнечной радиации препятствует нормализации на сельскохозяйственной деятельности: увеличиваются сроки созревания

1.1.3 Косвенное воздействие: роль аэрозолей как ядер конденсации (CCN) и ядер льдообразования (INP)

Ядра конденсации у песка и других твёрдых аэрозолей — это частицы, которые несут в себе потенциал для образования облаков и туманов. Частицы размером от 0,01 до 1 мкм способны вызывать состояние перенасыщения. [9] Краткосрочная изменчивость климата и погоды над конкретным регионом может проявляться не только из-за изменения энергетического баланса (нарушения радиационного баланса), но и через изменения в динамической микроструктуре облачных систем. Увеличение альбедо как результат роста числа ядер конденсации становится одним из механизмов косвенного воздействия.

Высокая удельная поверхность дисперсной фазы обеспечивает протекание физико-химических процессов в атмосфере. Атмосферные аэрозоли выполняют несколько ключевых функций: участвуют в фазовых переходах воды, определяют радиационный баланс, обеспечивают массоперенос твёрдого вещества и воды, а также служат поверхностью для гетерогенных химических и фотохимических реакций. Эти факторы лежат в основе формирования конвективной облачности, смерчей, торнадо, тайфунов и мощных циклонов, поэтому газодинамика аэрозольных частиц представляет особый интерес.

Ядра конденсации принято делить на три типа:

- гидрофильные (растворяющиеся в воде);
- гидрофобные (плохо смачиваемые);

- смачиваемые, но не растворяющиеся.

Минеральная пыль относится к последнему типу. В отличие от гигроскопичных морских солей или сульфатов, пылевые частицы не растворяются, но при повышении влажности воздуха на их поверхности образуется тонкая водная плёнка. Этого достаточно, чтобы при относительной влажности даже чуть ниже 100 % они начинали работать как ядра конденсации. Кроме того, многие пылевые минералы (глины, полевые шпаты, кварц) выступают эффективными ядрами льдообразования. При отрицательных температурах (ниже $-10...-15$ °C) они инициируют замерзание переохлаждённых капель, что меняет фазовый состав облаков, их отражательную способность и интенсивность выпадения осадков. [9]

Способность пылевых частиц выступать в роли ядер конденсации и льдообразования напрямую фиксируется методами спутникового дистанционного зондирования — например, по изменению аэрозольной оптической толщины (AOD) и по данным лидарного профилирования, что позволяет отслеживать не только сами выносы, но и их потенциальное влияние на облачный покров. Учёт этих эффектов остаётся одной из ключевых неопределённостей в климатических моделях, поскольку микрофизические процессы на ядрах конденсации часто параметризуются упрощённо, без детального разделения типов аэрозолей.

1.1.4 Неопределённости в климатических моделях, связанные с аэрозольным фактором

Аэрозоли создают значительную неопределённость в климатических моделях. Сложный состав примесей в атмосфере создают «слепую зону» для климатического прогнозирования, поскольку аэрозоль предстаёт одним из климатообразующим фактором. временные климатические модели демонстрируют значительные расхождения с данными наблюдений, что во многом обусловлено недостаточно корректным учётом атмосферных аэрозолей. Основной причиной неадекватности моделей является неточность сведений о

процессах генерации, физико-химических свойствах и пространственно-временной изменчивости аэрозольных частиц.

Ключевая неопределённость связана с тем, что аэрозоли рассматриваются в моделях преимущественно как рассеивающий фактор, тогда как они являются также и поглощающим компонентом атмосферы. Это приводит к ошибкам в оценках радиационного воздействия, особенно для аэрозолей минерального происхождения и сажи (песок относится к аэрозолю минерального происхождения). [8]

Кроме того, влияние аэрозолей как ядер конденсации на образование облачных систем и изменение глобального альбеда может быть существеннее, чем их прямое радиационное воздействие, однако в большинстве моделей этот механизм либо упрощён, либо не учитывается вовсе.

Дополнительные неопределённости вносят процессы, связанные с выделением и поглощением теплоты фазовых переходов в аэрозольных системах, которые по величине сравнимы с радиационными эффектами и порождают динамические обратные связи, слабо воспроизводимые в численных моделях. [8]

Наконец, существующие модели практически не учитывают роль естественных факторов (крупные вулканические извержения, изменения солнечной активности) в формировании многолетней изменчивости аэрозольного поля. Таким образом, неадекватность современных климатических моделей во многом связана с упрощённым представлением аэрозольного фактора, требующего дальнейшего совершенствования как в части описания микрофизических свойств, так и в части учета сложных обратных связей с облачностью и динамикой атмосферы.

1.2 Влияние пылевых выносов на жизнедеятельность человека

Минеральная пыль является доминирующим природным аэрозолем по массе выбросов. Несмотря на значительный разброс количественных оценок, все исследователи сходятся в том, что Северная Африка, и в особенности впадина

Боделе, представляет собой крупнейший и наиболее активный источник пылевого аэрозоля на планете. [32]

Понимание масштабов и пространственного распределения, сезонной динамики пылевого аэрозоля необходимо для корректной оценки аэрозольного фактора в климатических моделях и дальнейшего изучения.

1.2.1 Влияние пылевых выносов на деятельность и здоровье человека

Сильное загрязнение приземного слоя воздуха – основное, что несёт в себе песчаная буря. Значительное ухудшение условий для производственной деятельности человека, для функционирования техники включает в себе опасность для свободной бытовой деятельности и беспрепятственной организации рабочих процессов. Совокупность разных факторов в условиях пылевого возникновения могут привести к чрезвычайным ситуациям. В результате пыльных бурь населенные пункты, дороги, сельскохозяйственные угодья покрываются слоем пыли и песка толщиной до нескольких десятков сантиметров на площади, достигающей иногда сотен тысяч квадратных километров.

Пылевые аэрозоли, особенно мелкодисперсные фракции (менее 10 мкм), оказывают доказанное негативное воздействие на здоровье человека. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение атмосферного воздуха стало причиной 4,2 миллиона преждевременных смертей в 2019 году, и порядка 89% этих случаев пришлось на страны с низким и средним уровнем дохода. [34]

Мелкие частицы способны проникать в дыхательные пути и вызывать широкий спектр заболеваний: от респираторных инфекций и астмы до ишемической болезни сердца и хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ). По данным ВОЗ, мелкие дисперсные частицы (PM10 и PM2.5), содержащиеся в пыли, напрямую коррелируют с ростом заболеваемости. [33]

Наиболее уязвимыми группами населения являются женщины и дети. Исследования в Буркина-Фасо подтверждают, что воздействие пылевых бурь во

время беременности или в первый месяц жизни ребенка связано с повышением риска неонатальной смертности. [25]

1.2.2 Влияние пыльных бурь на сельское хозяйство

В результате пыльных бурь населенные пункты, дороги, сельскохозяйственные угодья покрываются слоем пыли и песка толщиной до нескольких десятков сантиметров на площади, достигающей иногда сотен тысяч квадратных километров. Пыльные бури являются одним из наиболее опасных метеорологических явлений для сельского хозяйства. [5]

Для сельского хозяйства пыльные бури наносят значительный экономический ущерб. Они приводят к механическому разрушению почвенного покрова, дефляции (выдуванию) верхнего, самого плодородного слоя почвы, обеднению её питательными веществами. [4]

Пыль, оседающая на растениях, подавляет фотосинтез, что ведёт к гибели посевов и снижению процента урожайности. Процессы дефляции почв способствуют их деградации и усилению опустынивания. По данным ФАО, ежегодные пылевые бури в регионе Ближнего Востока и Северной Африки создают постоянную угрозу продовольственную безопасность, снижая плодородие почв и их влагоудерживающую способность, что ещё больше усугубляет проблемы экономики и уровня жизни развивающихся стран. [5]

1.2.3 Влияние пылевых выносов на авиацию

Песчаные бури представляют собой прямую угрозу безопасности полётов. Они включены в реестр опасных гидрометеорологических явлений из-за комплекса неблагоприятных факторов.

- Снижение видимости: один из основных факторов риска. Нулевая (или почти нулевая) видимость в зоне аэропорта может сделать взлёт и посадку невозможными. Кроме того, видимость в наклонном направлении (при заходе на посадку) часто хуже при наличии аэрозольных масс в воздухе, чем горизонтальная, что затрудняет визуальное обнаружение ВПП даже при удовлетворительных наземных показателях.[11]

- Повреждение двигателей: пыль и песок, попадая в технические детали конструкции самолёта, вызывают эрозию лопаток компрессора. Под воздействием высоких температур (до 1600°C в камерах сгорания) силикатные частицы плавятся, образуя стекловидные отложения. Эти отложения могут перекрывать охлаждающие каналы и закупоривать топливные форсунки, что ведёт к перегреву и критическому снижению тяги, вплоть до отказа двигателя.[11]

- Абразивный износ: твёрдые частицы песка действуют как абразив, повреждая не только двигатель, но и фюзеляж. Это приводит к ускоренному износу, требует дополнительного технического обслуживания и увеличивает эксплуатационные расходы. [11]

1.2.4 Влияние пылевых выносов на другие природообразующие факторы

Пылевые выносы оказывают двойственное влияние на экосистемы Мирового океан.

С одной стороны, вынос биогенных элементов (железа, фосфора, кремния) с пылью из пустынь служит естественным удобрением для фитопланктона. Особенно важна роль железа, которое стимулирует рост фитопланктона в *олиготрофных* (бедных питательными веществами) районах океана, запуская тем самым биологический углеродный насос, что способствует поглощению CO₂ из атмосферы.

С другой стороны, переносимые пылью патогенные микроорганизмы и избыток питательных веществ могут быть факторами с негативным механизмами воздействия, например, влиять на здоровье коралловых рифов. Так, избыточное поступление азота и фосфора провоцирует вредоносное цветение водорослей (HABs), которое может вызывать массовую гибель кораллов. Взвешенные частицы оседают на коралловые полипы (отдельные организмы, образующие риф), повреждая их. [1,5]

1.3 Общие механизмы пылеобразования

1.3.1 Общие механизмы пылеобразования и выноса при песчаных бурях и низовых метелях. Определение, виды, условия формирования песчаных бурь

Песчаная буря – перенос больших количеств пыли и песка сильным ветром; основной причиной возникновения пыльных бурь является турбулентность в приземном слое, приводящая при некоторых критических значениях скорости ветра к отрыву частиц почвы (пыли, песка) от поверхности Земли. Необходимая скорость ветра для начала пыльной бури обычно находится в пределах значений 10-12 м/с, но в зависимости от структуры почвы это значение может меняться. [3]

Поднятая с земной поверхности пыль может оставаться в воздухе несколько суток. При этом она переносится на большие расстояния. Особенно долго пыль задерживается в атмосфере при сильно развитой конвекции в очаге формирования пыльной бури. Тогда наиболее мелкие частицы поднимаются очень высоко, образуя так называемую адвентивную мглу. В отличие от пыльных бурь такая мгла обычно наблюдается при слабых ветрах.

Возникновению пыльных бурь способствуют: аридность климата, интенсивная ветровая деятельность, равнинность территории, наличие почв легкого механического состава, засоленность почв.

Причины возникновения явления имеет свою классификацию, но основной причиной принято считать турбулентные вихри, возникающие при усилении ветра, и сильные вертикальные токи, образующие благодаря термической конвекции. Таким образом, проходящие рядом с пустыней циклоны, если рассматривать обобщенный вариант образования песчаного выноса, поднимают массы взвеси в воздух – под действием общей циркуляции атмосферы.

Помимо проходящих рядом депрессий, над пустынными регионами могут формироваться мезовихри – условия местной циркуляции атмосферы. Это происходит прежде всего из-за понижения давления у земли. Нагретая песчаная

тоща в то же время нагревает подстилающую поверхность, воздух начинает устремляться вверх, а на его место опускается холодный и плотный, что влечёт за собой образование неустойчивости – вихря. [3]

Так, при устойчивой стратификации воздуха ранней весной в тропической массе, в теплых секторах циклонов, слой приземного перегрева достигает нескольких сотен метров, а на высотах не наблюдается никаких влияний. Однако запыленность прогревает больший вертикальный разрез, уменьшая относительную влажность и повышая температуру воздуха.

Наиболее сильные пыльные бури возникают при устойчивой температурной стратификации, когда пыль не распространяется на весь пограничный слой атмосферы и выше, а сосредотачивается в его нижней части до высот 200-300 м.

По продолжительности. По продолжительности пыльные бури делятся на следующие типы:

а) Кратковременные с малым ухудшением видимости. Кратковременные бури, длящиеся около получаса, имеют видимость 3-4 км с периодическими улучшениями до 6-10 км. Причиной образования служат локальные изменения скорости ветра.

б) Кратковременные с значительным ухудшением видимости. Ухудшение видимости в таких бурях составляет до нескольких сотен-десятков метров. Они связаны с прохождением кучево-дождевого облака или резко выраженного холодного фронта второго рода с узкой полосой фронтальной конвективной облачности.

в) Длительная и пульсирующая песчаная буря с небольшим ухудшением видимости. Видимость ухудшается до 2-4 км. Возникают в устойчивых барических полях с большими градиентами, преимущественно на юго-западных/южных/юго-восточных перифериях хорошо развитых стационарных антициклонов.

г) Длительные пыльные бури с значительным ухудшением видимости. Ухудшение видимости до 500 м – 1 км, в начальной стадии – до нескольких

десятков метров. Условия формирования таких пыльных бурь связаны с прохождением фронтов, могут быть связаны с хорошо развитыми штормовыми зонами – областями больших барических градиентов. Этот тип бурь имеет большую вертикальную и горизонтальную протяженность

По условиям формирования различают:

- Фронтальные пыльные бури;
- Внутримассовые пыльные бури. [3]

1.3.2 Ветровой режим: эффект «природного ветрового тоннеля»

Уникальное местоположение впадины Боделе – между двумя горными массивами, – образует совершенные по своей исключительности условия ветрового переноса.

Полевые признаки ветровой дефляции включают ярданги, эрозионные останцы, эксгумированные корни растений и эксгумированные ландшафты, где ветровая эрозия удалила слои диатомита и обнажила подстилающие отложения.

Небольшие останцы диатомита указывают на то, что в прошлом дефляция была более обширной. Диатомитовые отложения белые или бледно-серые, умеренно литифицированные (процесс *литифицирования* – это превращение из рыхлых осадков в твёрдые), с явными следами ветровой эрозии: неровные поверхности эрозии и следы ударного воздействия (пескоструйной обработки)

Зафиксированные полевых переносов, как следует, – результат совместности факторов: мощный фоновый ветер и фокусировка этого ветра на эрозированных горных образованиях (о структуре горных массивов Тибести и Эннеди было упомянуто выше). Результирующей этой синергии получается низкоуровневое струйное течение (Bodele Low-Level Jet, LLJ). Низкоуровневое течение – устойчивое струйное течение, ядро которого расположено на высоте около 500 метров над поверхностью. В результате ускорения на этом уровне происходит непрерывные процессы дефляции, что усугубляет эрозию диатомитовых отложений на дне, а также горный массивов, пропускающих эти ветровые потоки. [32]

Таким образом, два фактора выносов можно представить:

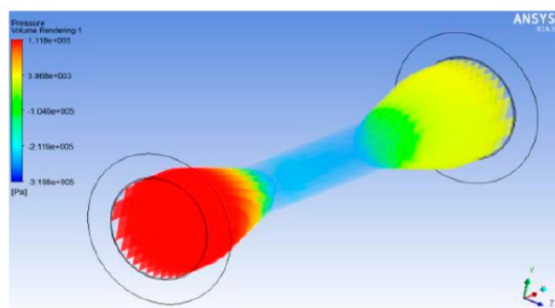
- Сильными ветрами, которые выступают *движущей силой*. В основном агентом этого фактора выступает пассатный ветер харматан. Харматан – это сухой и пыльный северо-восточный ветер, который господствует над Сахарой, особенной силой он отличается в зимний период. [1]

- Орографической особенностью, эффектом Вентури– процессом разрежения давления в потоке газа при прохождении его через узкую трубу. [29]

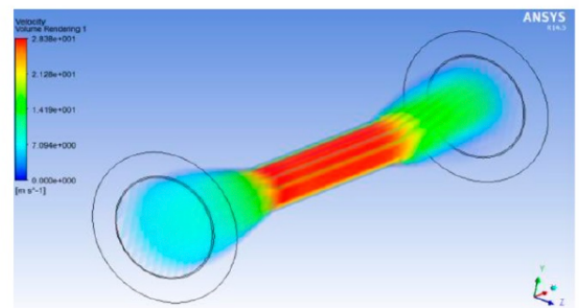
Пояснение работы эффекта Вентури в качестве географической особенности. На основе исследовательских работ было доказано, что при переходе жидкости от большего сечения к меньшему наблюдается увеличение скорости потока вместе с уменьшением статического давления жидкости. Это явление известно как эффект Вентури.

На основе эксперимента, произведённых университетом Нижнего Дуная, г. Галац, Румыния, были созданы CDF модели, демонстрирующие работу эффекта Вентури (см. Рисунок 1). Построенные модели трубки Вентури (Трубка Вентури –специальная гидродинамическая модель, созданная для анализа эффекта) были интегрированы через численный анализ с использованием программного обеспечения ANSYS CFX для наблюдения за параметрами потока рабочей жидкости (воздуха), циркулирующего через трубку. [29]

Эксперимент заключался в анализе прохождении потока жидкости через Трубку:



a) The values for static pressure



b) Velocity values

Рисунок 1 – CFD модель случая, построенная для эффекта Вентури. Источник: Scheaua F. D. Fluid flow inside a VENTURI tube: 3D modelling and CFD analysis

На рисунке представлены значения, зарегистрированные для статического давления и скорости потока рабочей жидкости внутри трубы.

Таким образом, были отмечены большие значения давления на входе для участка большого диаметра, а в медиальной части и на выходе – низкие. Уменьшение статического давления на входе, в среднем сечении скорость жидкости достигает высоких значений.

Данный эффект основан как на постулате неразрывности потока жидкости, так и на принципе сохранения механической энергии, или принципе Бернулли. Этот принцип показывает, что внутри определенной области потока уменьшение статического давления происходит тогда, когда достигается увеличение скорости жидкости. Понятие о потоке несжимаемой жидкости основано на законе сохранения энергии. [10]

Такие горно-долинные эффекты типичны ещё для некоторых областей на планете. Например, пролив Хуан-де-Фука, расположенный между Олимпийскими горами в штате Вашингтон и островом Ванкувер. Горный рельеф канализирует воздушные потоки, создавая сильные ветры. Ускорение ветра в горных «коридорах» является мощным природным механизмом, который порождает усиление ветровых потоков.

1.3.3 Пороговые условия эмиссии пыли

Процесс зарождения песчаной бури – это преодоление силами ветра сопротивления частиц на поверхности. Эмиссия начинается при срабатывании механических свойств среды: аэродинамический отрыв и сальтации (песчаной абразии). Эмиссия – это перенос аэрозоля под физическим воздействием среды и особенностей подстилающей поверхности.

Поднятие силами в физике ветровой эрозии описывается *пороговой динамической скоростью*, которая описывает касательное напряжение ветра на поверхности. Пока значение ниже критического значения, частицы остаются неподвижными, при превышении порога критического значения, – происходит отрыв от подстилающей поверхности.

При постоянном нарушении динамического равновесия необходимо знать скорость отрыва частиц от поверхности. Пороговые значения – это те значения, которые определяют, насколько быстро аэрозоль отделяется и поднимается в воздух. На пороговое значение влияет обыкновенно три фактора: влажность почвы, гранулометрический состав и наличие растительного покрова.

Для рассмотрения впадины Боделе необходимо учесть особенности субстрата, который подвергается выносу на данной территории – диатомит. Диатомит обладает исключительно низкой объемной плотностью и высокой пористостью, что приводит к понижению пороговой скорости. Эмиссия частиц запускается, когда скорость приземного ветра превышает пороговое значение 10 м/с-42. В период значительных пылевых событий оценочный поток пыли из впадины составляет $1,18 \pm 0,45$ Tg в день [16]

Механизм эмиссии над впадиной Боделе работает иначе, чем в большинства пустынях в мире.

1.4 География распределения пылевых источников

После рассмотрения теоретических основ изучения атмосферных аэрозолей, механизмов пылеобразования необходимо перейти к характеристике региона – впадины Боделе в Республике Чад.

Именно этот район является крупнейшим единичным источником минеральной пыли на Земле, и понимание его природно-климатической специфики служит обязательным условием для корректного анализа пылевых выносов.

Минеральная пыль является доминирующим природным аэрозолем по массе выбросов. Несмотря на значительный разброс количественных оценок, все исследователи сходятся в том, что Северная Африка, и в особенности впадина Боделе, представляет собой крупнейший и наиболее активный источник пылевого аэрозоля на планете. [32]

Понимание масштабов и пространственного распределения, сезонной динамики пылевого аэрозоля необходимо для корректной оценки аэрозольного фактора в климатических моделях и дальнейшего изучения.

1.4.1 Географическое образование региона

Современные исследования с использованием данных дистанционного зондирования показывают, что около 5% поверхности суши выступает в качестве активных источников минеральной пыли. Основные пылевые источники сосредоточены в так называемом «пылевом поясе», который протягивается от Северной Африки через Аравийский полуостров, Центральную и Южную Азию до территории Китая. Внутри этого пояса выделяются локальные «горячие точки», выраженные топографическими депрессиями с мощными аллювиальными отложениями, где ветровая эрозия достигает максимальной интенсивности (впадина Боделе в Чаде, впадина Тарим в Китае, озеро Эйр в Австралии и др.) [20]

Песчаные бури возникают только в местах, где есть соответствующий источник выноса. Покрытия разного типа могут быть подвержены эрозии, помимо пустынь, это могут быть также редкие луга, полупустынные территории, редкие дюны и хребты, и другие. Доминантой выступают несомненно пустыни, однако, при сочетании некоторых факторов (низкая влажность, высокая температура, сильный ветер) – эрозийные выносы охватывают большие географические массивы.

Ключевым регионом глобальной пылевой эмиссии является Северная Африка, прежде всего Сахара и Сахель. По оценкам, здесь сосредоточено от 55% до 67% всех мировых источников минеральной пыли. [19] Столь высокая концентрация источников объясняется сочетанием аридного климата, наличием рыхлых диатомитовых и песчаных отложений, а также специфической ветровой циркуляцией, в частности, низкоуровневым струйным течением Боделе. [21]

1.4.2 Физико-географическая характеристика региона

Треть суши – пустыни. Распространение пустынь на планете обусловлено глобальными атмосферными циркуляциями, пустыни концентрируются в области повышенного давления. Пустынная местность характеризуется малым количеством осадков до 150 мм в год, высокой испаряемостью. Формообразующий фактор для пустыни является ветер, – он создаёт те или иные формы рельефа.

Даже в голой пустыне песчаные участки обычно не являются первопричиной пылевых бурь. Роль ветра на аридной территории неоспорима, ведь скорости ветра над территорией пустынь бывает достаточно высокой до 25-60 м/с. Чем средняя скорость ветра больше, тем и зона воздействия выноса дальше. Так, например, аэрозоль из Сахары найден на востоке США. [12]

Зоны, подверженные выносам, характеризуются определенным типом почвы и особой структурой рельефа, климатическими особенностями.

Районы, богатые илом и глиной, являются причиной большинства пылевых бурь. Эти мелкозернистые почвы встречаются в районах с сухим озёрным дном и речными поймовыми отложениями. как это рассматривается в работе на примере впадины Боделе.

Впадина Боделе на севере Чада содержит ряд сухих озёрных донных низмин, образующих крупнейший в мире источник пыли. Крупные пылевые случаи, которые часто возникают в этом районе, в основном вызваны системой высокого давления над Северной Африкой, которая смещает северо-восточный ветер, под названием харматтан, тянущийся с Сахары.

Уникальность этого места также формируется благодаря близкому местонахождению двух гор, зазор между которыми создаёт естественную аэродинамическую трубу; прохождение сильного ветра через эту трубу усиливает поток на всей прилегающей территории. Зазор между двумя горами – Тибест и Эннеди – создаёт низковысотные струи (LLJ), фиксируемые на спутниковых снимках в виде дуг.

Горы Тибести играют ключевую роль в формировании низкоуровневого струйного течения (LLJ), которое и вызывает пылевые выносы. Тибести – горное плато в центральной Сахаре, расположенное на севере республики Чад. Высшая точка нагорья – вулкан Эми-Куси с высотой 3445 м. Нагорье простирается на 380 км по широте и более, чем на 350 км по долготе: занимает площадь более 100 000 км², что представляет крупнейшую геологическую структуру в Сахаре. [30]

Горное плато Эннеди сформировано песчаниками, представлено каньонами и ущельями, - продуктами ветровой эрозии. Оно расположено в ныне северной провинции Борку-Эннеди-Тибести [15]

1.4.3 Географическое положение впадины Боделе

Чад расположен в центральной части Северной Африки, между 7 ° и 23 ° северной широты, в пределах субтропического климатического пояса, известного как Сахель. Север Чада простирается далеко в засушливую пустыню Сахара, в то время как на юге климат значительно более влажный и типично тропический [17]

Впадина Боделе в северном Чаде представляет собой вытянутую с востока на запад котловину палеоозера длиной почти 500 км, шириной 150 км и глубиной около 160 м, площадью 133 532 км², окружённую хорошо выраженной голоценовой береговой линией на отметке 329 м (см. Рисунок 2)

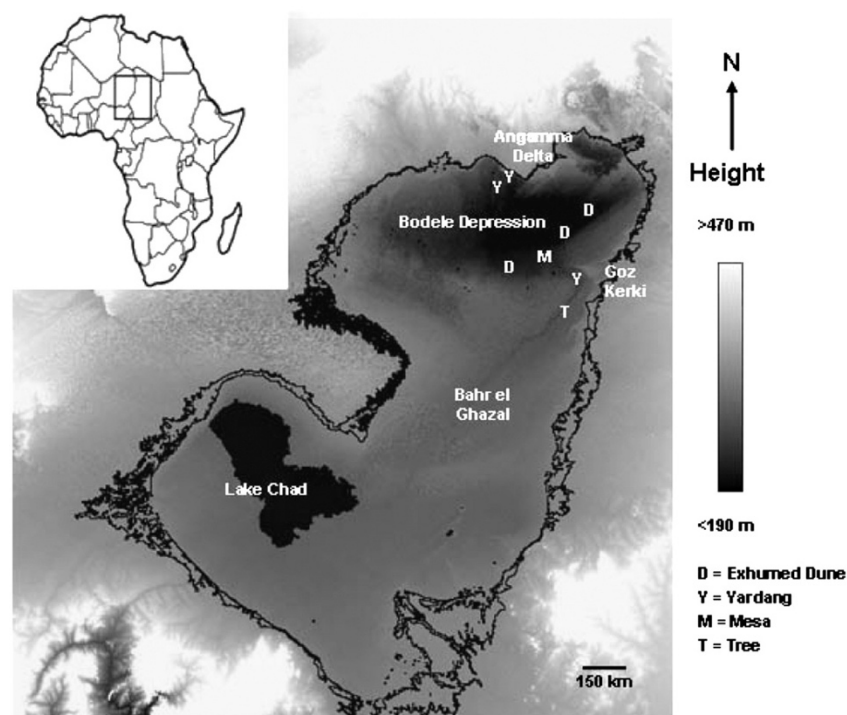


Рисунок 2 – Расположение палеоозера Мегачад относительно расположения впадины Боделе. Источник: Bristow C. S., Drake N., Armitage S. Deflation in the dustiest place on Earth: The Bodélé Depression, Chad // *Geomorphology*. – 2009. – Vol. 105, No. 1-2. – P. 50–58.

1.4.4 Геоморфологическая характеристика и подстилающая поверхность

Впадина Боделе в Чаде является крупнейшим единичным источником пыли на Земле благодаря сочетанию сильных приземных ветров и большого резервуара легко эродируемых, рыхлых, низкоплотных отложений. Согласно данным моделирования, в период с декабря по февраль на Боделе приходится около 24 пылевых событий, что является значительной долей от всех событий в Северной Африке (см. Рисунок 3).

В голоцене и позднем плейстоцене впадина Боделе была занята огромным озером — палеоозером Мега-Чад, которое теперь полностью высохло, обнажив озёрные отложения для дефляции. Высыхание в позднем голоцене обнажило эти чрезвычайно эродируемые осадки и сделало их уязвимыми для дефляции струйным течением Боделе.

Estimate of Mean Mineral Dust Emission in Tg ^a				
Time of Year	Region			
	Bodélé Depression	North Sahara	West Sahara	North Africa
December–February	24	57	10	124
March–May	14	104	13	174
June–August	2	26	39	87
September–November	8	18	8	42
Annual	48	205	70	428

^aBased on ECMWF ERA-Interim forecasts and the offline dust model by *Tegen et al.* [2002] for 1979–2010.

Рисунок 3 – Доля пылевых событий у впадины Боделе в соотношении с другими главными мировыми источниками. Источник: Todd M. C., Washington R. Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad: The role of the low-level jet // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32, No. 17.

Дефляция во впадине Боделе проявляется в виде эрозионных остатков от некогда цельных горных пород(останцев), выступающих в виде эоловых форм рельефа, представляющих собой систему узких параллельных гряд, их созданию способствует постоянный ветер, проходящий сквозь рельеф.

Озёрное дно сложено коренным диатомитом и эродированным диатомитом песком, озёрными песками и эксгумированными элементами от предыдущих состояний озера. (см. Рисунок 4)

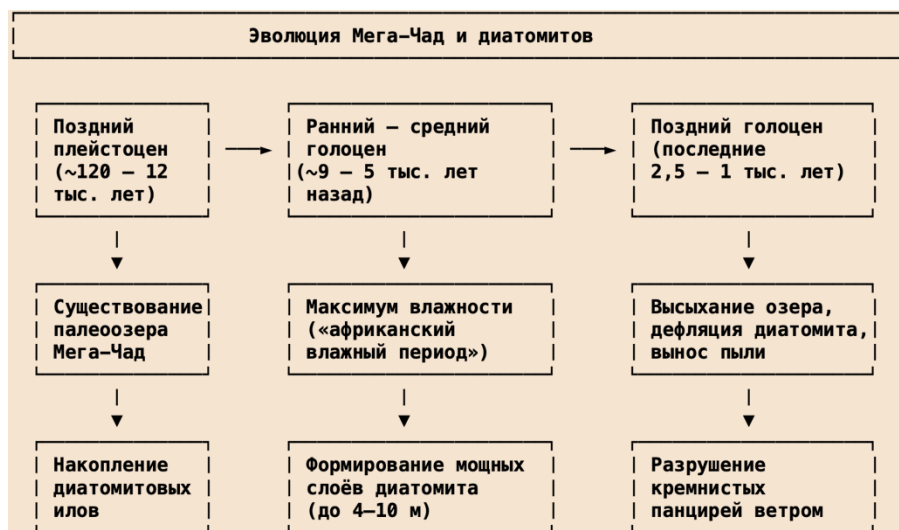


Рисунок 4 – Эволюция палеозавра Мега-Чад и диатомитовых отложений

Центр впадины Боделе сейчас в значительной степени покрыт диатомитом, имеет крупное обнажение этой породы. На спутниковых снимках она выглядит как область с очень высоким альбедо (диатомит имеет белый цвет с желтоватым оттенком).

Диатомит – природный глинистый материал, обладающий большой пористостью, адсорбционными свойствами и малым удельным весом. Большая часть диатомита имеет голоценовый возраст и была отложена во время высокого стояния палеоозера в раннем–среднем голоцене

1.4.5 Специфика субстрата: диатомиты и их свойства

Впадина Боделе представлена песчаным диатомитом. Среди песчаных диатомитов, мощность слоя составляет от нескольких сантиметров до 6 метров.

Песчаный диатомит имеет псамитовую структура (песчаную), состоит из обломков различной микроструктуры. Размер обломков от 0,1 до 2,0 мм.

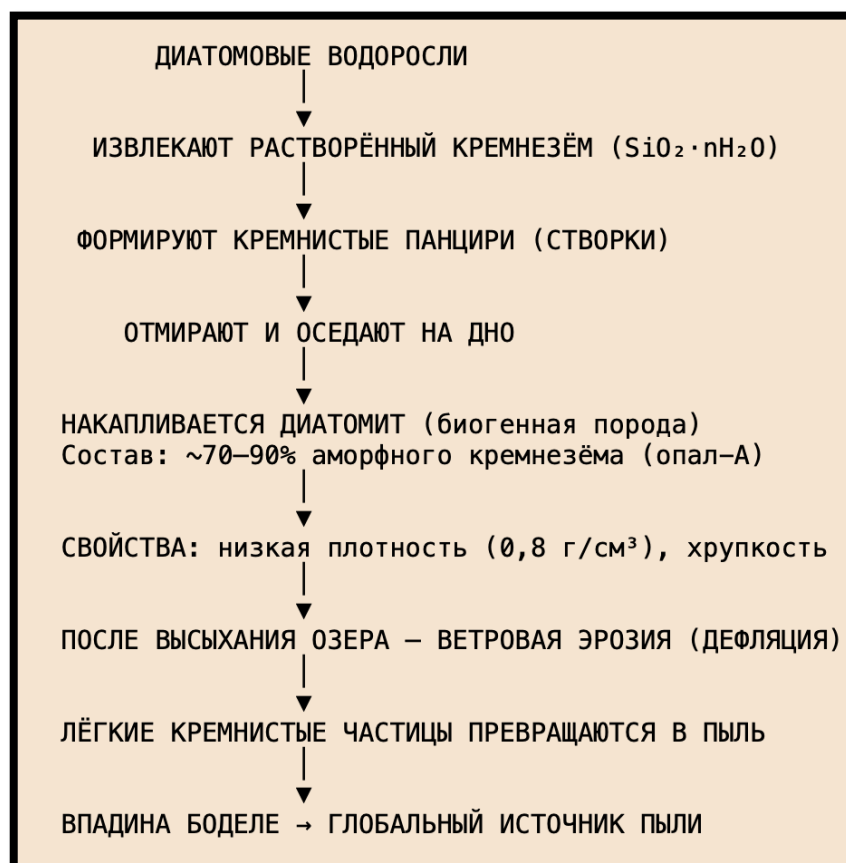


Рисунок 5 – Линейная связь между диатомитами и кремнезёмом

Диатомит – это биогенная осадочная порода, сложенная преимущественно кремнезёмом; кремнезём обуславливает такие свойства диатомита, как: лёгкость и хрупкость. Эволюция преобразования донного отложения представлена на схеме (см. Рисунок 5)

Донное отложение палеозера и настоящей впадины сформировалось под воздействием разложения продуктов вулканической деятельности и водорослевых останков.

В голоцене в палеоозере Мега-Чад диатомовые водоросли создали мощные залежи диатомита. После высыхания озера эти лёгкие и хрупкие кремнистые отложения стали идеальным субстратом для дефляции, что и обеспечивает современные масштабные пылевые выносы. [16]

1.4.6 Климатические условия Республика Чад

Широкий диапазон широт Чада (простирающийся к югу от тропика Рака более чем на 15°) соответствует такому же широкому климатическому диапазону — от влажного и сухого тропического до жаркого аридного. В городах Мунду и Сарх, находящихся одновременно в зоне влажного и сухого тропического климата, ежегодно с мая по октябрь выпадает от 800 до 1200 мм осадков. В центральной полусухой тропической зоне (Сахель), где расположена Нджамена, с июня по сентябрь выпадает от 300 до 800 мм осадков. На севере дожди редки: в Файя-Ларжо среднегодовое количество осадков составляет менее 100 мм.

В Чаде один относительно короткий сезон дождей. Сухой сезон, который длится с декабря по февраль по всей стране, относительно прохладен: дневные температуры составляют от середины 20 °C до середины 30°C, а ночные температуры опускаются до 10°C. Начиная с марта становится очень жарко, пока не выпадут первые сильные дожди. Например, в Нджамене средние дневные температуры с марта по июнь превышают 38 °C.

Среднегодовые температуры сходны на большей части территории страны и составляют 25–30 °C, существенно отличаясь лишь в более прохладных горных районах севера (15–25 °C). Однако сезонные колебания велики и имеют различный характер для разных частей страны. На севере и в центральных районах летние и зимние температуры заметно различаются: 27–35 °C летом и 20–27 °C зимой (в самых северных горных районах эти температуры круглый год на 5–10 °C ниже). На юге сезонные различия выражены слабее, однако летние месяцы (июль–сентябрь) являются самыми прохладными (22–25 °C) из-за охлаждающего эффекта дождей в это время года.

Сильные дожди в Нджамене начинаются в июле, и средние дневные температуры снижаются до 30°C, но ночные температуры остаются в районе 20°C до наступления сухого прохладного сезона в Нджамене в ноябре. [17]

1.4.7 Климатологическое положение впадины Боделе

По классификации российско-немецкого климатолога В.П. Кёппена впадина Боделе находится в зоне экстремально засушливого климата тропических пустынь – BWh (см. Рисунок 6, 9). В общем понимании экстремально-засушливый климат представляет собой регион с суммарной осадочной нормой 50-100 мм при низкой абсолютной и относительной влажности, что в сочетании с высокими температурами создаёт огромный дефицит испаряемости (см. Рисунок 7).

Согласно климатическому атласу, в районе станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau) среднегодовая норма осадков составляет от 10 до 25 мм, что значительно менее типичному определению зоны – 50-100 мм. Обыкновенно такой климат не предполагает наличие поверхностей водоёмов, характеризуется отсутствием растительности. Средняя относительная влажность не превышает значений 20-30%, что определяет характер воздушных масс над регионом как устойчивый. Экстремально сухой воздух препятствует образованию облаков и, следовательно, осадков. Этот аспект значительно сказывается на ветровой эрозии и понижении пороговых значений трогания частиц. Поэтому в сухой сезон даже умеренные ветры (10–12 м/с) легко поднимают диатомитовую пыль во впадине Боделе, тогда как во влажный период увлажнение поверхности временно блокирует эмиссию.

Температурный режим над впадиной Боделе определяется как резко-континентальный с экстремальными амплитудами. Среднесуточные температуры в тёплый период (апрель–сентябрь) регулярно превышают +40°C, а максимальные значения могут достигать +48...+50°C. Зимние месяцы (декабрь–февраль) приносят относительное «похолодание»: дневные температуры составляют +25...+30°C, тогда как ночью из-за отсутствия облачности и низкой влажности воздух может остывать до +5...+10°C. Такие суточные перепады (15–20°C) усиливают физическое выветривание диатомитовых отложений, а постоянный перегрев поверхности в сочетании с

высоким дефицитом влаги создаёт условия для максимальной эродируемости субстрата даже при умеренных скоростях ветра.

Ветровой режим является важнейшим аспектом для эрозийного переноса. В определении ветров заключено несколько особенных типов, которые господствуют над впадиной Боделе: 1) орографические ветры (эффект Фенга; описан ранее), который акселирует северо-восточный ветер, который преобладает над впадиной, согласно климатологическому атласу в осенне-зимний период – харматан (см. Рисунок 8) ; 2) Усиление северо-восточного ветра ведёт к другому ветровому преобразованию – низкоструйному переносу воздушных масс (LLJ). Ветер играет особую роль в сухой период, когда выносы максимальны. [17, 26]

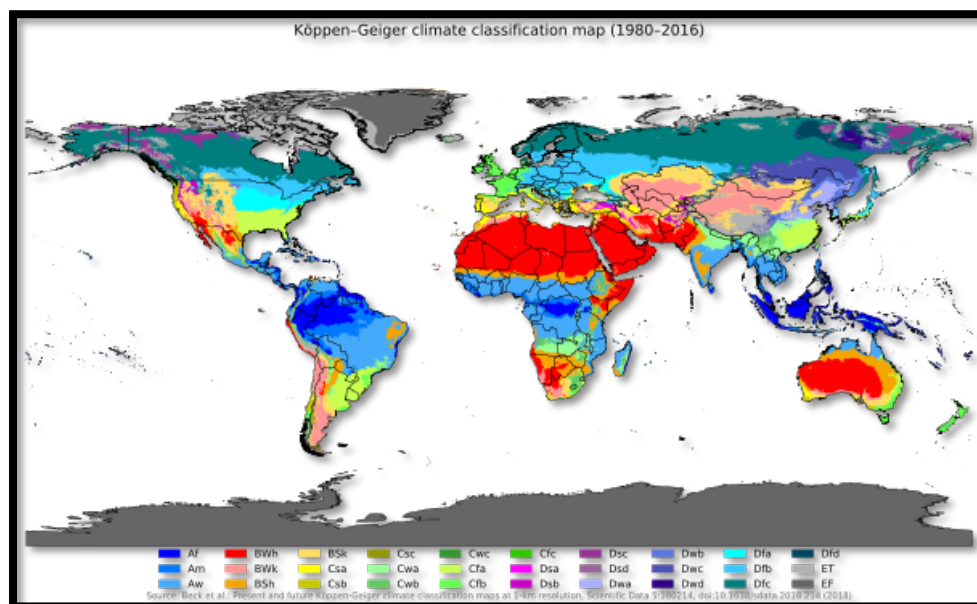


Рисунок 6 – Схема распределения климатических поясов В.П.Кёппена 1980-2016 гг. Источник: Классификация климатов Кёппена // Рувики : [сайт]. — URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Классификация_климатов_Кёппена (дата обращения: 04.05.2026)



Рисунок 7 – Климатический атлас Африки. Годовая норма осадков над станцией Ларжо. Источник: Климатический справочник Африки. Ч. 1: Температура воздуха, осадки / под ред. А. Н. Лебедева. — Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во, 1968. — 111 с.

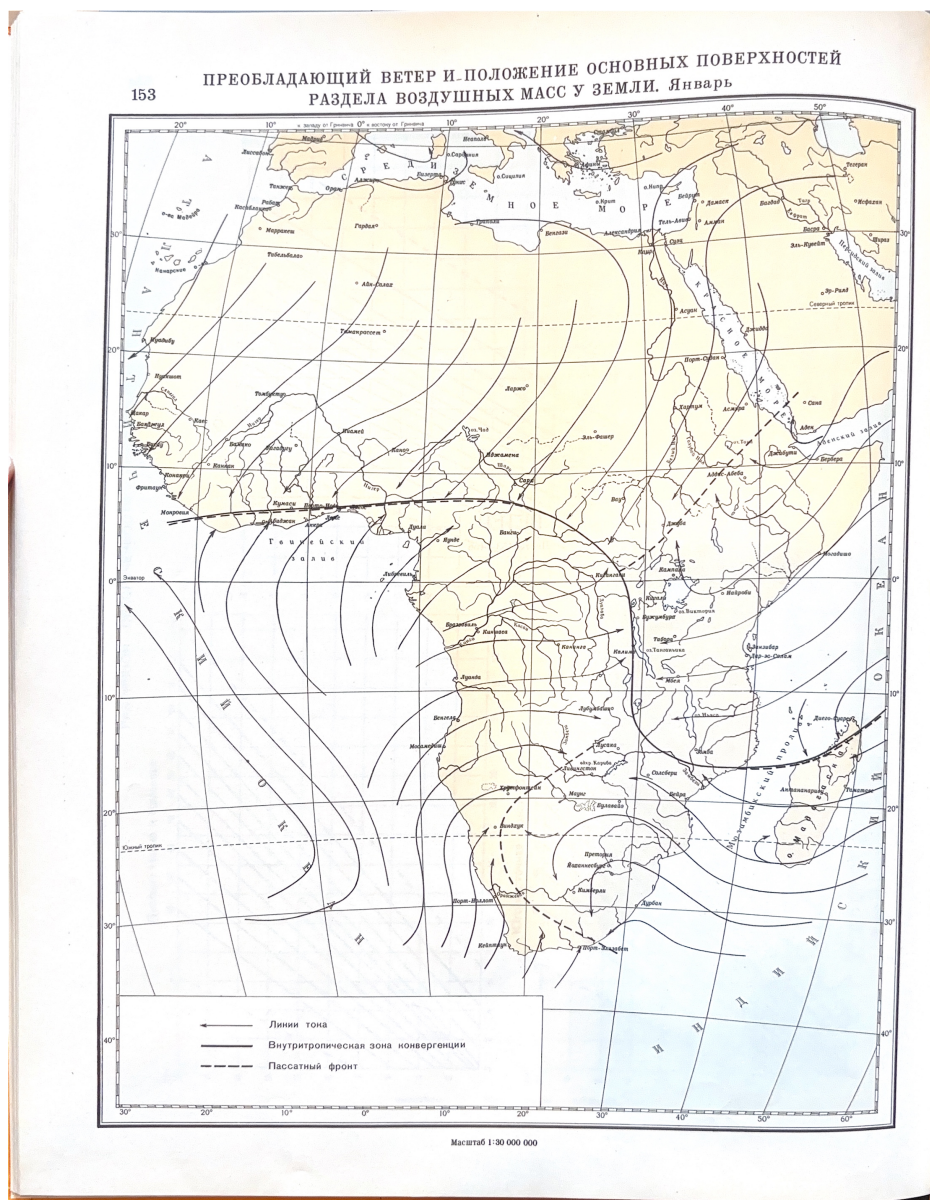


Рисунок 8 –Климатологический атлас Африки. Преобладающий ветер – северо-восточный. Источник: Климатический справочник Африки. Ч. 1: Температура воздуха, осадки / под ред. А. Н. Лебедева. — Ленинград :

Гидрометеорологическое изд-во, 1968. — 153 с.

1.4.8 Сезонная и суточная изменчивость выносов

Повторяемость пыльных бурь зависит от типа подстилающей поверхности и особенностей синоптического процесса, благоприятных для возникновения этого явления. Для анализа изменений также важна и суточная и сезонная изменчивость. Сезонная повторяемость песчаных явлений определяют общий

годовой фон, а суточные циклы дают представление о том, как наступление явления влияет на изменение в краткосрочной перспективе.

Классический суточный ход повторяемости пыльных бурь соответствует следующему суточному ходу ветра: максимум в утренние часы и предполуденные часы и минимум во вторую половину дня и ночью. Над регионом впадины происходят не совсем типичные суточные флуктуации.

Ночные процессы образования инверсии не просто формирует устойчивый инверсионный слой, при ослаблении трения и турбулентности одновременно усиливается и низкоструйное течение (LLJ) над регионом. Образование инверсионных слоёв наблюдается при стандартных условиях уменьшения поступления радиации на землю, остывание подстилающей поверхности уменьшает энергетические токи, необходимые для образования турбулентности. Слой с уменьшенным трением подхватывается потоком низкоструйного течения, который является первопричиной пылевых выносов обыкновенно зимой. С восходом ночная инверсия разрушается и с турбулентными токами начинает активно смешиваться и низкоструйное течение, – передача импульса от LLJ земной поверхности, – что обуславливает сильные утренние порывы.

Сезонность. В аридных регионах, в тропических регионах выделяются два сезона – сухой и влажный. Наибольшая трудность исследований, связанных с выносом аэрозольного песка, заключается в точном определении и разделении годового запаса влаги над областью изучения, определение влияния циркуляции в тот или иной месяц.

Хотя в центральных и южных регионах Чада влажный сезон действительно длится с мая по октябрь, для северной пустынной зоны, где находится впадина Боделе, ситуация совсем иная.

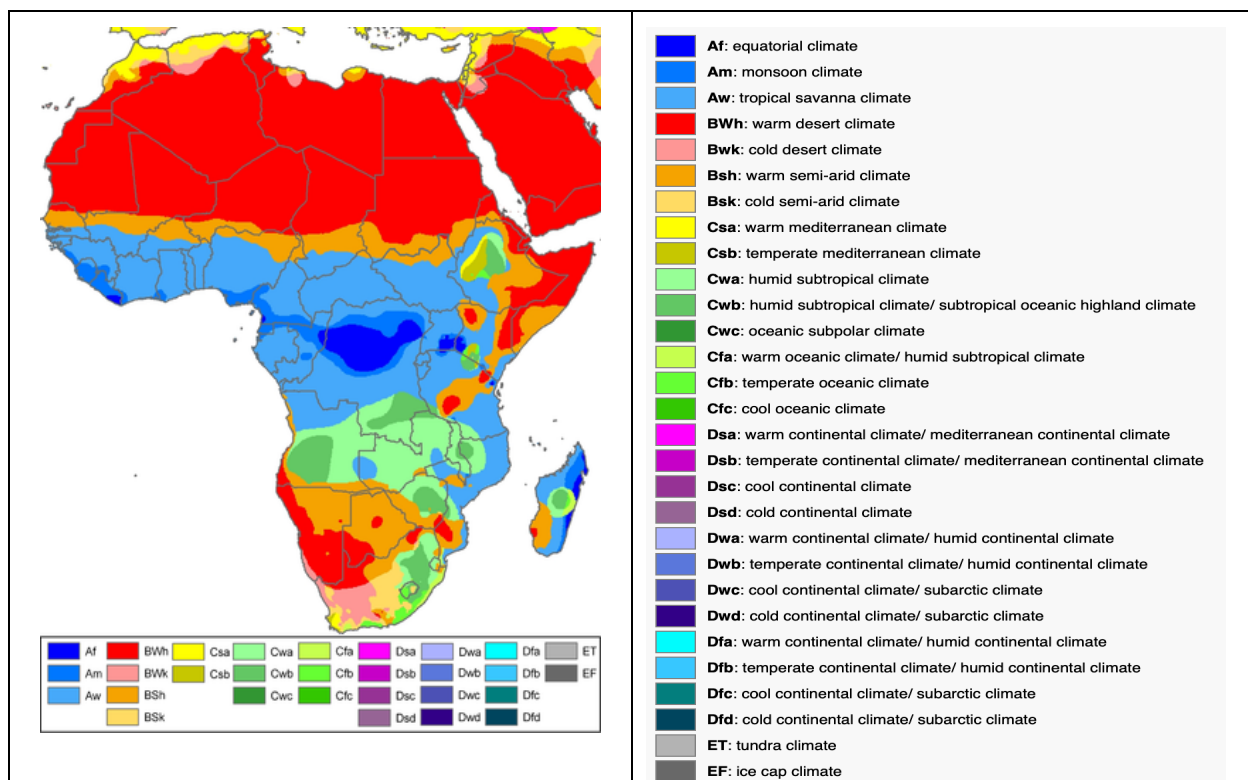


Рисунок 9 – Климатические зоны Африки, влияющие на сезонную изменчивость, Карта климатических поясов мира . Источник: [Всемирная карта климата Кёппена – Гейгера], URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Köppen-Geiger_Climate_Classification_Maps_for_Chad)

Климатическая зона Севера Африки разделяется на три подзоны с разными вариациями начала и конца влажного сезона.

- Северная зона (Пустыня Сахара): Влажный сезон здесь наиболее короткий и непредсказуемый, в основном с июня по сентябрь. Осадков выпадает крайне мало (менее 100-150 мм в год). Именно этот период можно считать аналогом влажного сезона для впадины Боделе.
- Центральная зона (Сахель): Сезон дождей длится с июня по сентябрь, с возможными осадками в мае и октябре. Это переходная зона с годовым количеством осадков 300-600 мм.
- Южная зона (Суданская саванна): Самый продолжительный и влажный сезон —с мая по октябрь. Годовое количество осадков здесь превышает 1200 мм.

Таким образом, в то время как для южных и центральных районов Чада влажный сезон длится с мая по октябрь, для северной пустынной зоны, где расположена впадина Боделе, сезон дождей значительно короче (в основном с июня по сентябрь) и характеризуется крайне низким количеством осадков (менее 150 мм в год) (см. Рисунок 7).

2 Выбор и обоснование методов анализа пылевых выносов

Раздел 2 посвящен детальному описанию методологии исследования для песчаных выносов и обоснование выбора для данной работы.

2.1 Методы мониторинга пылевых выносов

Для обеспечения безопасности живущих на территориях, подверженных пылевыми выносами, для поддержания бесперебойной работы и организации полезной деятельности человека, существуют методы мониторинга пылевых событий.

На данный момент существуют способы наземного и спутникового обнаружения пылевых выносов, на основе наблюдений исследователи составляют прогнозы и делают выводы о паттерных случаях в разных точках земного шара.

2.1.1 Пассивные спутниковые методы

Пассивные методы основаны на регистрации естественного излучения (солнечного или теплового), отражённого или испущенного системой «атмосфера — земная поверхность». Ключевое преимущество — широкий пространственный охват и высокая периодичность наблюдений, однако их точность сильно зависит от свойств подстилающей поверхности и освещённости.

Видимый и инфракрасный (VIR) метод использует отражённую солнечную радиацию в видимом и ближнем ИК-диапазонах для идентификации пыли в дневное время. Пыль хорошо детектируется по повышенному альбедо в коротковолновой части спектра и характерному поглощению в УФ-диапазоне (аэрозольный индекс TOMS/OMI).

Тепловой инфракрасный (TIR) метод работает на длинах волн 8.5, 11.0 и 12.0 мкм и позволяет различать пыль среди других типов аэрозолей и облачности, а также фиксировать пылевые выносы над яркими поверхностями (пески, солончаки) и в ночное время.

Наиболее часто используемым прибором является MODIS (спектрорадиометр среднего разрешения), широко применяемый в исследованиях пыльных бурь благодаря своему превосходному пространственному охвату.

Также широко используемые сенсоры — спектрорадиометры, VIIRS, SeaWiFS и OMI (аэрозольный индекс UV AI). Для практической части данной работы был использован спектрометр OMI.

Восстановление AOD над сушей выполняется по алгоритмам Deep Blue (для ярких пустынных поверхностей) и Dark Target (для растительности). Над океаном методы основаны на предположении о нулевом отражении водной поверхности в ИК-диапазоне.

Калибровка и валидация спутниковых данных проводятся по глобальной сети наземных солнечных фотометров AERONET (AErosol RObotic NETwork), обеспечивающей высокоточные прямые измерения АОТ. Главное преимущество наземных приборов при измерении аэрозолей заключается в том, что они измеряют атмосферу напрямую. Входящее излучение в верхней части атмосферы хорошо известно, поэтому измеренное вымирание происходит только из-за аэрозолей и газов. Однако они находятся в фиксированном месте, поэтому широкое покрытие или пространственная информация не получается.

Прямые измерения с помощью пассивных дистанционных методов затруднены, поскольку свет дважды проходит через атмосферу, а неизвестная и изменчивая часть спектра поглощается поверхностью. Другой проблемой является угол солнечного зенита, который связан с вариациями рассеяния света.

2.1.2 Активные спутниковые методы (лидарные)

В отличие от пассивных, активные методы используют собственный источник зондирующего излучения (лазер) и регистрируют обратно рассеянный сигнал. Это упрощает регистрацию происходящего на и над земной поверхностью, позволяет получать вертикальные профили аэрозольных слоёв и работать в

любое время суток. Основной инструмент — CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) на борту спутника CALIPSO.

Принцип действия: лазер генерирует короткие импульсы на длинах волн 532 и 1064 нм, направляемые в атмосферу. Регистрируя задержку и интенсивность обратного сигнала, определяют высоту и оптическую толщину аэрозольных слоёв с вертикальным разрешением 30–60 м и горизонтальным примерно в 333 м. Наличие поляризационного канала позволяет надёжно идентифицировать несферические частицы минеральной пыли по высокому коэффициенту деполяризации.

Отличительное преимущество — определение высоты пылевого слоя и отслеживание его вертикального перемещения, что критически важно для оценки дальнего переноса и климатических эффектов.

Ограничения метода заключается в распознавании похожих сигналов от плотных пылевых слоёв и тонких облаков, что может приводить к ошибочной классификации, особенно вблизи источников выноса. К минусам лидарных измерений можно также отнести их недолговечность, лазеры обыкновенно недолго служат в космическом пространстве, что увеличивает затратность использования такого метода съёмки.

2.1.3 Гиперспектральные методы

Гиперспектральные методы представляют собой расширенное визуальное определение аэрозольных выносов. В отличие от мультиспектральных методов, работающих на широких спектральных каналах, гиперспектральные способы используют данные сотен узких спектральных интервалов. Эта особенность делает гиперспектральную съёмку наиболее информативной, позволяя точно определять вплоть до состава подстилающей поверхности, состава атмосферы в окружении источника выноса. Знание о типе аэрозоля — инструмент для разных исследований в смежных областях науки. Массы частиц различных составов влияют на климатические колебания: одни взвеси охлаждают атмосферу, другие — нагревают.

Регистрация спектральной структуры идёт по трем каналам: видимый и ближний инфракрасный (VNIR) с диапазоном 400-1000 нм, коротковолновый инфракрасный (SWIR) с диапазоном 1000-2500 нм. Последний используется для спектральных исследований выносов из впадины Боделе, поскольку SWIR-диапазон позволяет надёжно идентифицировать фундаментальную полосу поглощения глинистых минералов, которые – основа озёрного дна источника.

В мире существует несколько гиперспектральных систем: Hyperion (EO-1, NASA), EMIT, AVIRIS и другие. С точки зрения рассмотрения пылевых выносов не все системы подходят для рассмотрения, например EMIT разработан специально для картирования минерального состава пылевых источников планеты, а Hyperion предоставил данные для исследования впадины Боделе.[18]

Те первые исследования показали, что состав поверхности отложения составляют окислы железа, глинистые минералы (каолинит-сметитовой группы) и сульфаты (гипс). С помощью этого же исследования было доказано, что в воздух поднимаются те же частицы, что и лежат на поверхности, а это доказательство неоспоримо важно для изучения физики переноса частиц.

Способ обработки данных с этих систем – это линейно-спектральное разделение (LSU). Определяет количество исследуемого минерала в каждом пикселе изображения. Ключевым преимуществом способа является его работа на поканальной основе, что особенно важно при низком контрасте пыли над яркими пустынными поверхностями, и позволяет работать вблизи источника эмиссии. [18]

2.1.4 Методы синоптического анализа и реанализа

Синоптический анализ позволяет выявить крупномасштабные атмосферные процессы, сопровождающие пылевые выносы. Для оценки условий, благоприятных для подъёма пыли, используются стандартные карты погоды и прогностические поля:

- Карты абсолютной топографии (АТ) 300, 500 и 850 гПа– для отслеживания высотных ложбин и струйных течений. Наличие струйного течения в мощной высотной ложбине указывает на усиление приземного циклона и фронтов, что особенно важно для зимних пылевых бурь.

- Карты приземного давления (MSLP) и приземного ветра – для выявления фронтов и зон сильного ветра.

- Прогностические аэрологические диаграммы – для оценки вертикальной устойчивости атмосферы. Сухоадиабатический градиент от поверхности через глубокий перемешанный слой способствует подъёму пыли на большую высоту.

- Поля относительной влажности на 700 гПа и 6-часовые суммы осадков – для исключения участков, где влажность или осадки препятствуют пылеобразованию.

Данные реанализа предоставляют непрерывные по времени и пространству поля ветра, температуры, геопотенциала и вертикальной скорости. Они используются для ретроспективного анализа синоптических ситуаций, при которых происходили интенсивные выносы из впадины Боделе. По полям ветра на 850 и 700 гПа можно идентифицировать пассатную циркуляцию (харматан) и низкоуровневое струйное течение (LLJ), а вертикальная скорость – зоны подъёма воздуха, способствующие выносу пыли.

2.1.5 Методы моделирования траекторий переноса

Для определения источников пыли и путей её распространения применяются модели расчёта траекторий движения воздушных масс. Наиболее распространённой является модель HYSPLIT (NOAA), которая позволяет строить прямые и обратные траектории на основе полей ветра реанализа (GFS, NCEP, ERA5). Прямые траектории показывают, куда переместится пыль из заданной точки в будущем, обратные – откуда пришла воздушная масса в заданный момент в прошлом. Для впадины Боделе обратные траектории HYSPLIT позволяют подтвердить местное происхождение пыли, а прямые –

оценить дальность переноса пылевых шлейфов вплоть до Атлантики и Южной Америки.

Прогнозирование переноса пыли на различные сроки осуществляется с помощью глобальных и мезомасштабных моделей. Долгосрочный прогноз (3–7,5 суток) использует глобальные модели пылевого переноса (DTA-GFS, NAAPS, IFS-GEMS, GFS-GOCART, NMMB/BSC-Dust, MOCAGE). Оцениваются крупномасштабные синоптические процессы (внетропические ложбины), которые усиливают ветровой режим и запускают эмиссию пыли. Среднесрочный прогноз (24–72 часа) применяет мезомасштабные модели (BSC-DREAM8b, NMMB/BSC-Dust, Chimere-DUST, SKIRON, CUACE/DUST, MASINGAR, ADAM) с более высоким пространственным разрешением. Анализируются поля пороговой динамической скорости, приземного ветра, влажности почвы и прогнозируемой видимости. Краткосрочный прогноз (0–24 часа) основывается на спутниковых снимках (RGB-композиции, продукты детекции пыли), приземных картах, аэрологических диаграммах и данных мезомасштабных моделей. Особое внимание уделяется разрушению ночной инверсии и развитию конвективного перемешивания, которое приводит к утреннему пику выносов.

2.2 Обоснование выбора данных и методов

Для решения задач работы был использован комплекс из тех средств и методов, которые описаны в 2.1. Для точечных и выверенных характеристик использованы лишь те материалы, которые подходят под задачу определения и количественной фиксации пылевых выносов из впадины Боделе за последние годы. В работе использованы наземные, спутниковые и реаналитические данные, а также инструменты визуализации и моделирования. Выбор каждого компонента комплекса обоснован его доступностью, пространственно-временным разрешением и способностью работать с данными выбранного региона. Ниже приведено обоснование выбора каждого источника-инструмента с указанием их ограничений.

2.2.1 Метеостанция Файя-Ларжо

Значения инструментальных данных были загружены из архивов RP5 по характеру своей доступности и достоверности. На сайте за довольно продолжительный период хранятся данные SYNOP/METAR, и продолжают обновляться. По материалам архива были скачаны массивы данных, которые помогли восстановить поля ветра, установить горизонтальную видимость и узнать код явления погоды (WW) в моменты выносов с дискретностью стандартных метеорологических сроков – 3 часа

Станция Файя-Ларжо (Faya-Largeau) была выбрана как самая ближайшая к источнику выноса – впадине Боделе. Расстояние между станцией и впадиной примерно 100-120 км. Это обеспечивает высокую репрезентативность наземных наблюдений для фиксации явлений песчаной бури, пыльной бури, песчаного позёмка, обложной пыли и общего ухудшение видимости. Более того, станция расположена прямо на пути прохождения типовых пылевых шлейфов, которые при обострении харматана движутся с северо-востока на юго-запад, пересекая пункт – Файя-Ларжо.

2.2.2 Реанализ MERRA-2, сервис GIOVANNI

Ансамбль реанализа MERRA-2 позволяет работать с региональными данными с достаточно высоким пространственным разрешением, а благодаря использованию алгоритму Deep Blue продукт правильно восстанавливает оптическую толщину (AOD) над контрастными районами пустыни.

Получение данных осуществлялось через интерактивный сервис Giovanni (NASA GES DISC), который позволяет оперативно строить временные ряды и карты распределения AOD без локального скачивания больших массивов. Для оценки ультрафиолетового воздействия пылевых выносов был определён UV-аэрозольный индекс (UV Aerosol Index) из продуктов спутника OMI/Aura (NASA). Данные также получены через сервис Giovanni

Помимо получения данных через интерактивный сервис Giovanni, также были скачены массивы MERRA-2 через портал GES DISC для сравнения ручной и машинной версий обработки AOD.

2.2.3 Поля ветра и синоптика

Из набора MERRA-2 (реанализ-визуализация) также доступны в открытом доступе для скачивания поля приземного ветра, и ветра на изобарических поверхностях. Из источника были скачены карты для каждого выбранного срока с значением ветра на высотах: 10 метров, 850 Гпа, 700 Гпа.

Сервис с глобальными моделями Ventusky использовался для подтверждения или опровержения наличия низкоструйного течения (LLJ). Так, за ветер LLJ принимался ветер с направленностью СВ и скорости больше или равной 12 м/с.

2.2.4 Использование данных с WorldView

Сервис использовался для определения типа аэрозоля в выбранные сроки. Worldview использовался исключительно для определения типа аэрозоля по продукту Deep Blue Aerosol Type (VIIRS), который классифицирует частицы как пыль, дым, морскую соль и т.д. Истинные цветные композиты применялись для дополнительной визуальной верификации, но основная цель — идентификация пылевого типа.

Количественный и качественный анализ всех рассмотренных индексов может также производиться с помощью этого сервиса, однако, его недостаток заключается в точечном просмотре и оценке данных путём наведения — рассчитывается количественная характеристика, что может быть удобно для единичных случаев рассмотрения.

2.2.5 Спутниковый анализ EUMETRAIN / ePort (VIS/IR)

Для оценки пылевых шлейфов были использованы реальные положения ситуаций над регионом, заснятых спутниковым продуктом. Для визуального дешифрования пылевых шлейфов, их формы, направления движения и

пространственной структуры использовался инструмент ePort в составе образовательного портала EUMETRAIN.

За основу исследования были взяты спектральные каналы спутника MSG(SEVIRI): VIS (0,6), IR (10,8) DUST RGB. VIS канал рассматривает с точки зрения высокого разрешения в дневные часы – детальная оценка морфологии пылевого шлейфа, границы и структуру; 0.6 — это широко используемый канал, который измеряет отражённую солнечную радиацию в диапазоне примерно 0,56–0,71 мкм (видимый красный свет). Недостаток канала заключается в его временном ограничении (только дневные часы) и использовании в идеальных для наблюдения условиях – в безоблачную погоду.

Для локализованного рассмотрения и снятия ограничений был рассмотрен дополнительно канал IR излучения и DUST композит. Принцип работы многоспектрального Dust RGB композита создан на основе комбинации инфракрасных (IR) каналов SEVIRI (IR8.7, IR10.8 и IR12.0). Использование IR-каналов позволяет детектировать пылевые шлейфы круглосуточно, исключая влияние даже тонких облаков. В этом композите пыль подсвечивается характерным розовым или пурпурным цветом, что делает её легко идентифицируемой на фоне пустынной поверхности и облачности.

2.2.6 Ограничения использованных методов

В отдельности каждый метод несёт в себе ограничительные условия, при комплексном подходе эти ограничения нивелируются или сглаживаются, создавая полный обзор ситуаций с минимальными недостатками в информационном материале об объекте исследования.

Ограничения реанализа (MERRA-2) заключается в принципе восполнения, с помощью ассимиляции имеющихся объемов значений индексы просчитываются компьютерными вычислениями. Это не прямые измерения объекта, они не отражают всей пространственной неоднородности вблизи источника. Все характеристики зависят от качества модели, реанализ может

также занимать пиковые значения для очень интенсивных кратковременных выносах из-за сглаживания во времени.

Ограничения спутникового продукта заключается во времени суток его использования, облачности и времени пролёта спутника. Мощный и кратковременный вынос может не быть зафиксирован в связи с несовпадением срока, попасть в междусрочье. Также даже специализированные IR-компози́ты (Dust RGB) могут ошибочно интерпретировать некоторые типы облаков или поверхности как пыль.

Ограничение наземных наблюдений: точечность данных. Данные о синоптическом материале отражают конкретные условия на аэродроме, что может не совпадать значениям по всей длине пылевого выноса. Также архив не всегда может быть полон, возможны пропуски, учитывая специфику работу метеослужб в регионе.

3 Использование данных спутниковых снимков при выявлении пылевых выносов в районе впадины Боделе

В данном разделе будут рассмотрены случаи, которые создают доказательную базу для работы. Для работы были сформированы архивы карт реанализа и снимков региона впадины Боделе за 2023 год, 2024 год и 2025 год.

В качестве доказательной базы были подобраны изображения со спутниковых регистраторов (сканеров), которые подтверждают наличие пылевого шлейфа, позволяющего его дешифровать вынос (длина шлейфа) над исследуемым объектом; визуальная часть подкрепляется количественными данными продукта NASA GES DISC (коэффициент для аэрозольной оптической толщины, влияние ультрафиолетового излучения) и синоптическим материалом MERRA-2 (прохождение пассата, потока низкоструйного течения)

Результатом работы стала таблица, представляющей весь собранный материал в наглядной форме (см. Таблица 1)

Таблица 1. Все рассматриваемые случаи с опорой на данные метеорологической станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau)

	год	месяц	утро/день/вечер	Фая-Ларао, дата, местное время	UTC	Скорость ветра (м/с)	Направление ветра	Видимость (км)	WW	АОТ максимум по выносу	АОТ по траектории впадина-станции	UV INDEX	Тип аэрозоля	LLJ (да/нет) на 850 >=12 м/с СВ	Длина шлейфа, км	Сравнение (ср. max по месяцу скорр/2000-2025)(голубой цвет - меньше среднего, оранжевый - выше среднего)	АОТ скорр max.	АОД 2025	Сезон	номер случая	
зима	2025	январь	утро	06.01.2025 10:00	9.00	13	СВ	0,8	НМ	98.43	70.30	15	пыль	да	736	0,543/0,433	0,54	0,61	сух	1	
		январь	утро	22.01.2025 09:00	8.00	14	СВ	0,4	ПБ	77.92	61.63	15	пыль	да	466	0,430/0,433	0,43		сух	2	
	2023	февраль	день	06.02.2023 12:00	11.00	14	СВ	0,6	ПБ	117.6	80.10	10	пыль	нет	311	0,645/0,516	0,65		сух	3	
		декабрь	утро	12.12.2023 10:00	9.00	13	СВ	5	НМ	92.44	65.10	28	пыль	да	221	0,511/0,416	0,51		сух	4	
весна	2025	март	день	28.03.2025 14:00	13.00	13	СВ	0,8	ПБ	102.2	70.30	15	пыль	нет	635	0,564/0,686	0,56		0,61	сух	5
		апрель	утро	09.04.2025 11:00	10.00	13	СВ	0,5	НМ	131.6	105.40	20	пыль	нет	562	0,727/0,636	0,73			сух	6
		апрель	утро	10.04.2025 10:00	9.00	17	СВ	0,1	НМ	182.7	125.30	25	пыль	нет	297	1,01/0,63	1,01			сух	7
		апрель	утро	25.04.2025 09:00	8.00	14	СВ	0,8	ПБ	143.33	110.13	35	пыль	да	273	0,79/0,63	0,79			сух	8
		май	утро	18.05.2025 08:00	7.00	16	СВ	0,2	НМ	156.4	95.10	15	пыль	да	271	0,864/0,686	0,86			сух	9
		май	утро	19.05.2025 08:00	7.00	14	СВ	0,8	ПБ	156.4	130.9	35	пыль	да	213	0,864/0,686	0,86			сух	10
	2024	апрель	утро	18.04.2024 08:00	7.00	14	СВ	0,8	ПБ	98.16	80.60	20	пыль	нет	218	0,542/0,636	0,54			сух	11
		апрель	утро	26.04.2024 09:00	8.00	14	СВ	0,6	ПБ	110.57	100.44	25	пыль	нет	280	0,611/0,636	0,61			сух	12
		март	день	25.03.2023 12:00	11.00	14	ВСВ	0,9	ПБ	153.3	120.10	20	пыль	да	289	0,847/0,578	0,85			сух	13
	2023	апрель	утро	12.04.2023 10:00	9.00	13	СВ	0,1	НМ	301.1	136.6	35	пыль	да	467	1,662/0,636	1,66			сух	14
		ноябрь	утро	05.11.2024 09:00	8.00	11	СВ	2	НМ	70.76	50.10	23	пыль	да	220	0,391/0,395	0,39	сух		15	
осень	2025	октябрь	утро	01.10.2023 11:00	10.00	16	СВ	0,1	ПБ	170.7	152	15	пыль	да	376	0,943/0,517	0,94	сух	16		
		октябрь	день	02.10.2023 15:00	14.00	13	ВСВ	0,9	ПБ	299.9	135	20	пыль	да	475	1,656/0,517	1,66	сух	17		
		ноябрь	утро	14.11.2023 09:00	8.00	12	СВ	1,5	НМ	90.11	70.61	33	пыль	да	230	0,498/0,395	0,50	сух	18		
среднее						13,8		0,9		143	22,4			363							
лето	2023	июнь	день	06.06.2023 12:00	11.00	12	ЮЮЗ	1	НМ	127.6	99.74	20	пыль	нет	362	0,705/0,703	0,70	0,61	вл	19	
		июнь	утро	19.06.2023 11:00	10.00	12	СВ	1	НМ	118.4	93.20	15	пыль	нет	196	0,654/0,703	0,65		вл	20	
		июнь	утро	27.06.2023 08:00	7.00	10	СВ	3	НМ	93.17	43.71	15	пыль	нет	144	0,514/0,703	0,51		вл	21	
		июль	утро	07.07.2023 08:00	7.00	17	СВ	3	НМ	73.05	49.73	15	пыль	нет	153	0,403/0,703	0,40		вл	22	
		июль	утро	26.07.2023 09:00	8.00	17	СВ	5	НМ	83.19	74.81	15	пыль	да	138	0,459/0,774	0,46		вл	23	
		август	утро	16.08.2023 09:00	8.00	11	СВ	3	НМ	60.58	36.20	15	пыль	да	156	0,335/0,692	0,33		вл	24	
	2024	июнь	утро	18.06.2024 08:00	7.00	10	СВ	3	НМ	141.4	115.50	15	пыль	да	187	0,781/0,703	0,78		вл	25	
		июнь	утро	03.06.2025 08:00	7.00	13	СВ	4	НМ	110.4	86.49	15	пыль	да	152	0,610/0,703	0,61		вл	26	
		июнь	утро	16.06.2025 08:00	7.00	13	СВ	5	НМ	92.62	43.89	15	пыль	да	143	0,511/0,703	0,51		вл	27	
		август	утро	07.08.2025 10:00	9.00	12,0	СВ	4	НМ	51.67	51.67	15	пыль	нет	168	0,285/0,692	0,29		вл	28	
		август	утро	16.08.2025 10:00	9.00	12	СВ	2	НМ	74.2	57,8	10	пыль	да	131	0,410/0,692	0,41		вл	29	
осень	2025	сентябрь	утро	20.08.2025 09:00	8.00	14,0	ВСВ	1,5	НМ	84.61	75.57	15	пыль	да	147	0,468/0,692	0,47	вл	30		
среднее						12,8		3,12		57,8	15			172			вл	31			
Где: СВ - северо-восточное направление ветра, ВСВ - востоко-северное- восточное направление ветра, ЮЮЗ- юго-юго-западное направление ветра; НМ - низовая метель, ПБ - пыльная/песчаная буря; сух - сухой сезон; вл - влажный сезон;																					

Характеристика использованных материалов и методов :

В рамках практической части работы для анализа пылевых выносов из впадины Боделе применялся комплекс взаимодополняющих методов, основанных на данных дистанционного зондирования, наземных метеорологических наблюдений и реанализа.

Первым этапом анализа стало визуальное дешифрирование пылевых шлейфов по спутниковым снимкам высокого разрешения. Для этого использовались цветные RGB-композиции и специализированные пылевые RGB-композиции, полученные со спектрорадиометров SEVERI (MSG). Источником снимков служил сервис ePort (EUMeTrain) и Worldview (NASA EOSDIS) –MSG и VIIRS (Suomi NPP) снимки. Визуальный анализ позволил идентифицировать форму, направление и пространственную протяжённость пылевых шлейфов, а также подтвердить факт выноса в конкретные даты. Выполненные расчёты проводились с помощью инструмента на открытом портале ePort – Линейка (Measure).

Для количественной оценки аэрозольной нагрузки использовались данные аэрозольной оптической толщины (AOD) по реанализу MERRA-2 – продукт Deep Blue Aerosol Optical Depth (Land), адаптированный для ярких пустынных поверхностей.

Построение временных рядов и карт среднемесячных значений AOD(AOT) выполнялось с помощью сервиса Giovanni (NASA) - MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics V5.12.4 (M2T1NXAER). Дополнительно привлекались данные Dust Aerosol Optical Depth из реанализа MERRA-2 для сопоставления с ветровыми полями модели GFS с открытого источника – Ventusky и встроенными метриками от спутников различных миссий реанализа MERRA-2 (visualization).

Идентификация типа аэрозоля и верификация пылевого происхождения зафиксированных выносов проводилась по продукту Deep Blue Aerosol Type

(Land Ocean) от VIIRS (NOAA-20), который классифицирует аэрозоль по типам (пыль, дым, морская соль и др.).

Анализ синоптических условий, сопровождавших пылевые выносы, выполнялся по полям реанализа MERRA-2 (visualisation). Рассматривались следующие параметры: горизонтальный ветер (компоненты U и V) на уровнях 850 гПа и на высоте 10 м, геопотенциал (z), вертикальная скорость (ω) и давление на уровне моря (MSLP). Это позволило выявить пассатную циркуляцию (ветер харматан), идентифицировать низкоуровневое струйное течение (LLJ) и определить зоны подъёма воздуха, способствующие эмиссии и вертикальному выносу пыли.

Верификация спутниковых данных проводилась по наземным метеорологическим наблюдениям станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau), расположенной в непосредственной близости от впадины Боделе, расстояние между объектами менее 300 км. Данные SYNOP были получены через сервисные архивы сайта RP5. [28] Для каждого зафиксированного случая анализировались направление и скорость ветра, код явления погоды (WW – пыльная буря, песчаный позёмок) и горизонтальная видимость (VV). Сопоставление ухудшения видимости с наличием пылевого шлейфа на спутниковых снимках позволило подтвердить локальный характер выносов и оценить их интенсивность.

Комплексное применение перечисленных методов обеспечило надёжную идентификацию пылевых выносов, их количественную оценку, верификацию по наземным данным и анализ синоптических механизмов, что позволило выполнить все поставленные в работе задачи.

Количественная оценка производилась на основе данных с метеостанции Файя-Ларжо (Faya-Largeau). Эта станция является главным наземным источником информации о погодных условиях в непосредственном отдалении от «самого пыльного места на Земле». [31]

Отбор и классификация пылевых выносов (2023-2025)

В рамках полевых исследований в районе впадины Боделе (Республика Чад) в период 2023–2025 гг. выполнялся сбор данных о пылевых выносах по последующей методике. Фиксация моментов с максимальной интенсивностью выноса осуществлялась на основе данных о метеорологической дальности видимости, получаемых с ближайшей к району исследований метеорологической станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau). Критерием отбора служили эпизоды, в которых видимость снижалась до значений, характерных для пыльных и песчаных выносов (обычно ≥ 5 км). Случаи фиксировались в зимние (декабрь–февраль), весенние (март–май), летние (июнь–август) и осенние (сентябрь–ноябрь) месяцы.

Для каждого эпизода определялись значения аэрозольной оптической толщи (АОТ) двумя способами: максимальный вынос – по пиковому ослаблению излучения в момент наибольшей запылённости, и траекторный вынос – путём интегрирования вдоль предполагаемой траектории воздушной массы, значение ультрафиолетового индекса (UV Index). Также фиксировалась такая информация: информация о сроке наблюдения дата, время (местное и UTC), скорость и направление ветра, наличие низкоуровневого струйного течения (LLJ) на изобарической поверхности 850 гПа, а также тип аэрозоля - пыль) и визуальные признаки пылевого события (песчаная буря, низовая метель, обложная пыль (см. Таблица 1)

Для качественной оценки пылевых выносов необходимы дополнительные характеристики, - индексы, которые описывают ослабление света при прохождении через толщу воздуха. Эти индексы измеряют оптическую толщину, ультрафиолетовое излучение, используя методику спутниковых алгоритмов и модели реанализа. Анализ данных над впадиной Боделе послужил наземной проверкой спутниковых данных. При помощи математических вычислений были проиллюстрированы инструментальные измерения на местности.

Рассматривались также спутниковые продукты и инструменты веб-анализа на основе этих спутниковых прогнозов. Для определения наличия

шлейфа использовался VIS диапазон снимков со спутника MSG, для дальнейшего анализа за основу брались снимки с радиометра MSG - DUST RGB. С помощью инструментов измерения были сделаны выводы о длине пылевых шлейфов при различных синоптических условиях, а то есть и природе появления пылевого случая.

3.1 Оценка верификационных данных со станции Файя-Ларджо и климатологические закономерности

Для работы над системой предупреждения выносов в регионе мы рассмотрим каждую метеовеличину отдельно, уточнив статистические закономерности и климатические нормы. В процентном соотношении оценим интересующие ключевые ситуации, в совокупности ведущие к пылевому случаю. Выделим аномалии и сделаем предположение, по каким причинам они появляются.

3.1.1 Пылевые случаи и видимость

Из 31 рассмотренного случая в 18 (58 %) видимость снижалась до 1 км и ниже (≤ 1 км), что соответствует мощным пылевым выносам. Экстремально низкая видимость (0,1–0,4 км) зафиксирована в 6 случаях, причём все они пришлись на утренние часы и сопровождалась скоростью ветра 13–17 м/с. (см. Рисунок 13)

В сухой сезон (ноябрь–май) средняя видимость при выносах составляет 1,4 км, во влажный сезон (июнь–октябрь) – 3,2 км. Это связано с сезонными изменениями увлажнения почвенного покрова: во влажный сезон даже при сильном ветре эмиссия пыли подавлена из-за повышенной влажности и коркообразования.

Сравнение с многолетними данными показывает, что рассматриваемые выносы относятся к верхнему квартилю интенсивности (видимость хуже 2,5 км), а 2024 год оказался аномально спокойным – ни одного случая видимости < 1 км, что может указывать на влияние крупномасштабных циркуляционных аномалий (ослабление харматана) или началом двухгодичного цикла:

- 2023 год – умеренная активность (8 выносов с видимостью <1 км, минимальная 0,1 км);
- 2024 год – аномально спокойный (0 выносов с видимостью <1 км);
- 2025 год – экстремально активный (19 выносов с видимостью <1 км, многократные падения до 0,1 км). (см. Рисунок 10-12).

Такая картина «пик – спад – пик» с интервалом в два года соответствует известной тропической двухгодовой осцилляции (ТВО), которая модулирует интенсивность харматана и муссона над Западной Африкой



Рисунок 10 – Видимость 2023 с сезонным разделением (сухой/влажный период)., с наблюдаемой на метеостанции видимостью (для характерных для бури значений – до 6 км)

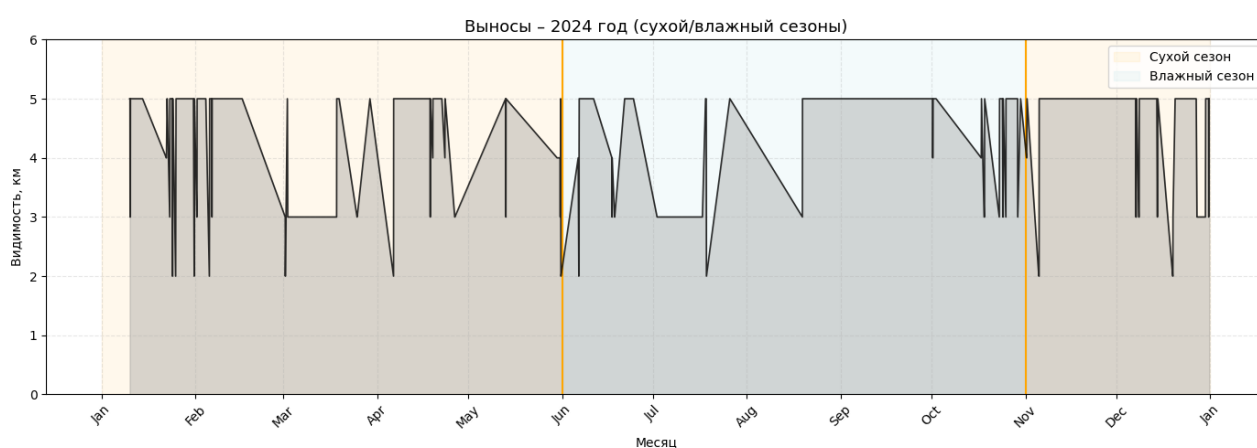


Рисунок 11 – Видимость 2024 с сезонным разделением (сухой/влажный период)., с наблюдаемой на метеостанции видимостью (для характерных для бури значений – до 6 км)

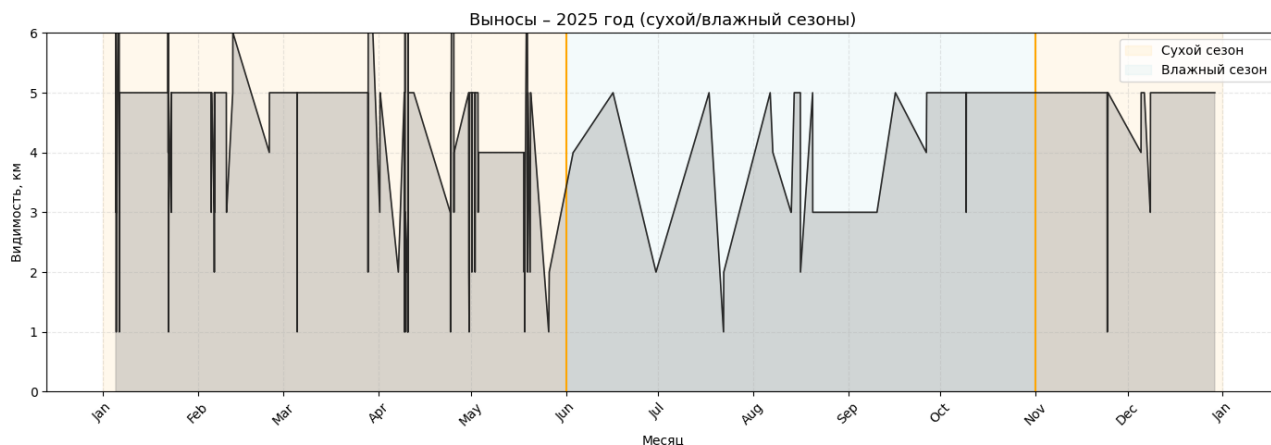


Рисунок 12 – Видимость 2025 с сезонным разделением (сухой/влажный период), с наблюдаемой на метеостанции видимостью (для характерных для бури значений – до 6 км)

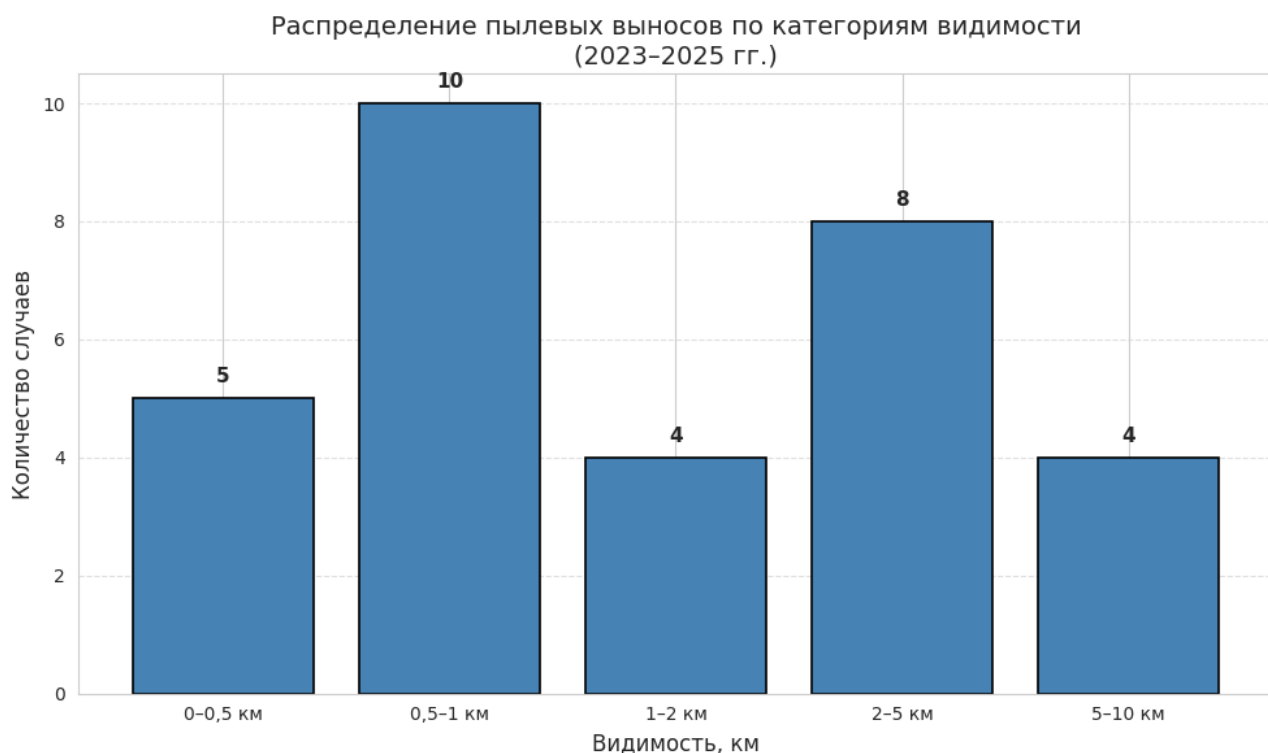


Рисунок 13 – Распределение пылевых выносов по категориям видимости

3.1.2 Направление и сила ветра

На розе ветров (см. Рисунок 14,15,16) видно, что выносы происходят при северо-восточном направлении ветра (в 87% случаев), что согласуется с прохождением местного ветра харматан и низкоструйным течением (LLJ)

зачастую в сухой сезон. Ветры других направлений единичны и связаны с конвективными процессами во влажный сезон. А скорость ветра в 80% случаев составляет 10-15 м/с, в сухой сезон значительная часть выносов имеет значение скорости ветра 15-17 м/с. Это объясняется усилением горизонтального барического градиента между зимним азиатским антициклоном и внутритропической зоной конвергенции в сухой сезон.

Сравнение с климатической нормой скорости ветра на станции (средняя годовая 8 м/с) показывает, что все выносы соответствуют аномально сильным ветрам (50–100 % от нормы).

Роза ветров указывает на исключительную роль пассатного ветра харматан для пылевых выносов.

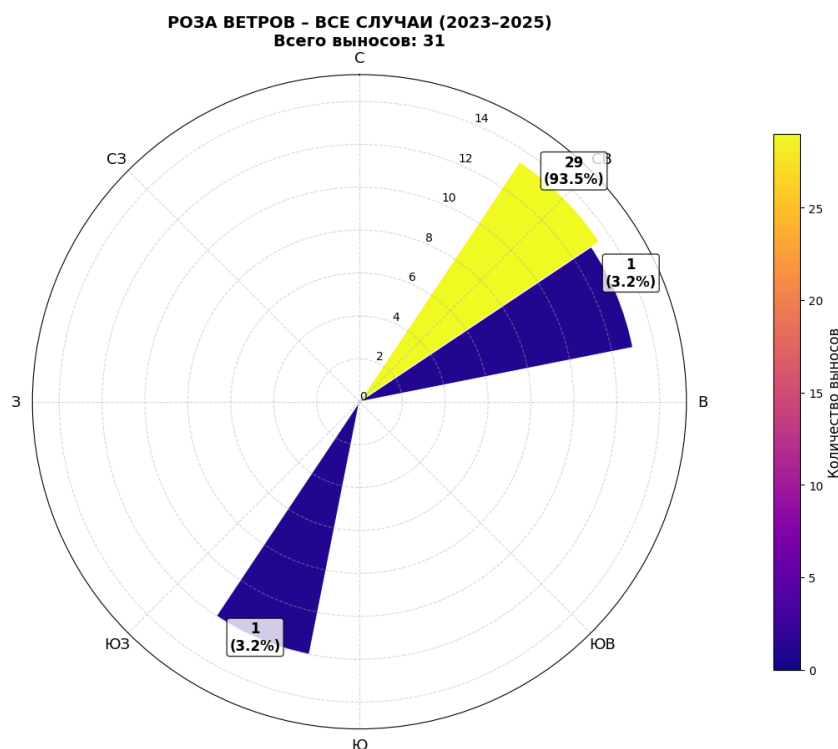


Рисунок 14 –Построенная роза ветров на основе метеорологических наблюдений на станции (скорость ветра/направление) для всех отобранных случаев (31)

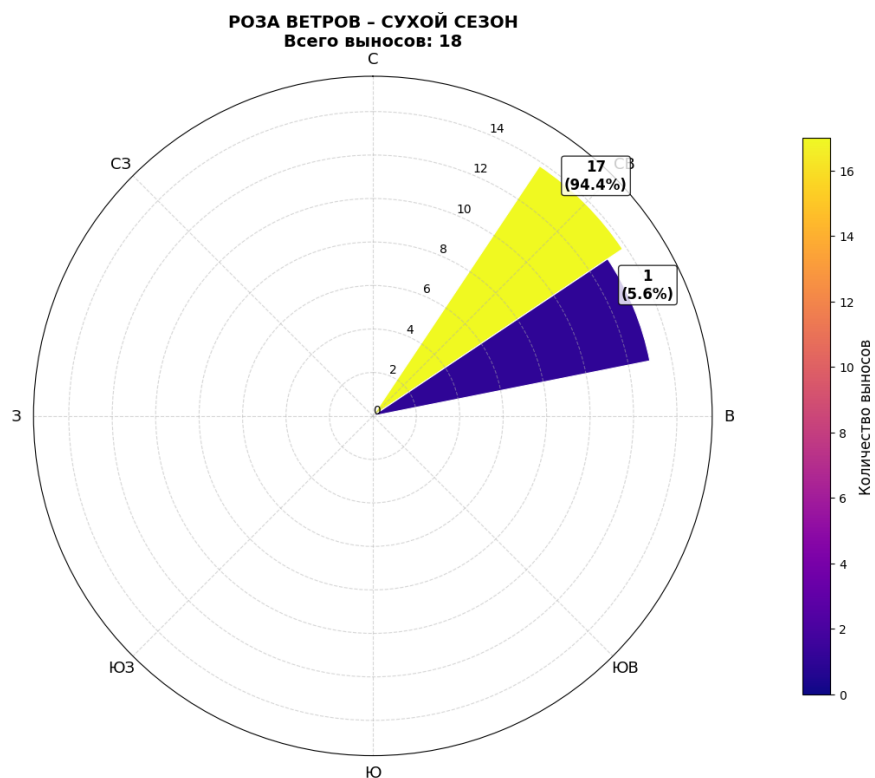


Рисунок 15 –Построенная роза ветров на основе метеорологических наблюдений на станции (скорость ветра/направление) для всех сухого сезона

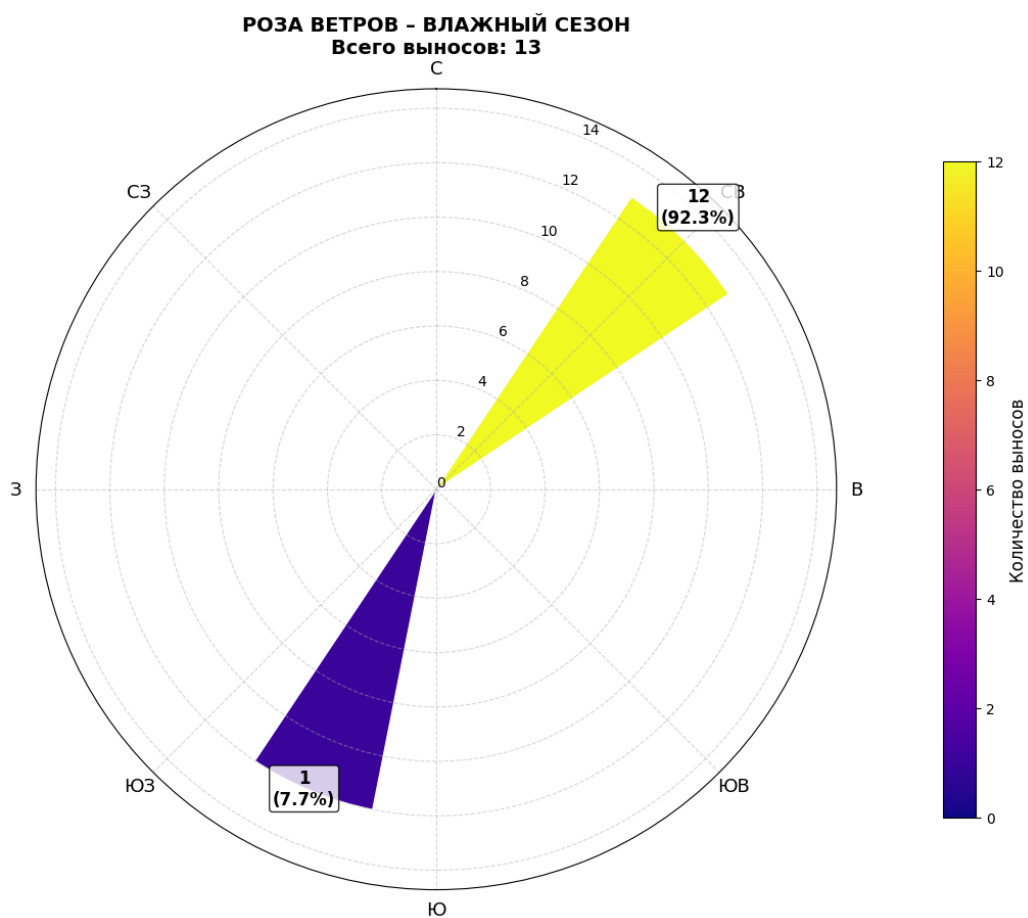


Рисунок 16 – Построенная роза ветров на основе метеорологических наблюдений на станции (скорость ветра/направление) для влажного сезона

3.1.3 WW

При рассмотрении метеорологических явлений, устанавливается, что наиболее распространёнными являются низовые метели, их повторяемость зафиксирована в 58% из рассмотренных случаев. Низовые метели характерны для пылевых выносов средней интенсивности (ухудшение видимости 3.0-7.0 км). (см. Рисунок 17)

Пылевые и песчаные бури фиксируются при интенсивном переносе аэрозоля и ухудшении видимости 0.0-3.0 км. В работе было рассмотрено 42% от всей выборки.

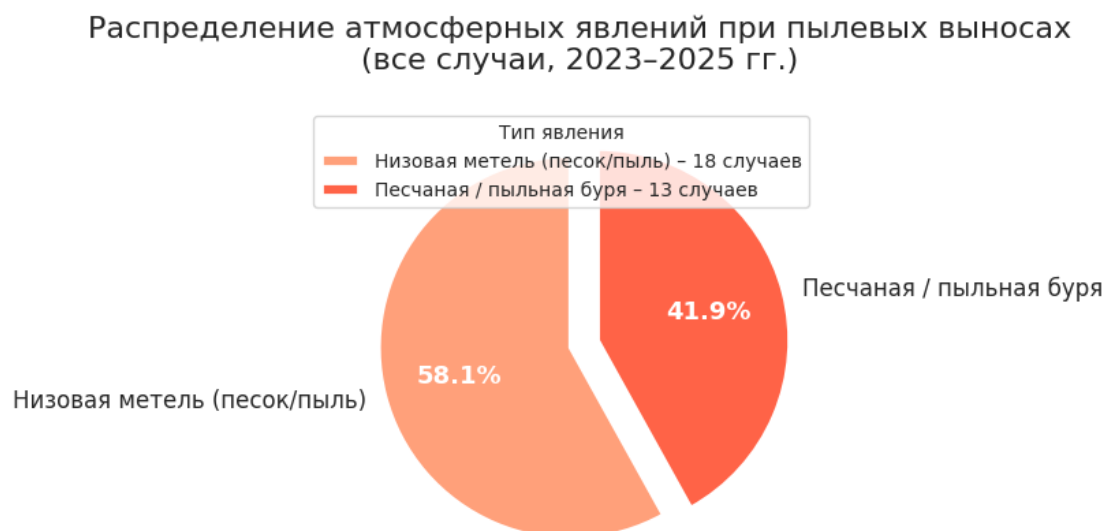


Рисунок 17 – Повторяемость метеорологических явлений (WW) при пылевых выносах

3.1.3 UV

Наиболее часто-зафиксированное значение УФ-индекса составило 15-20, на этот диапазон пришлось 16 случаев. Высокие значения 25-35 приходятся на сухой сезон (апрель, октябрь), а во влажный сезон есть случаи, где УФ-индекс не превышает 10, что связано с наименьшей запыленностью и большей облачностью. (см. Таблица 1, Рисунок 18-19)

Над впадиной Боделе УФ-индекс в летние месяцы в среднем на 30–40 % ниже, чем весной, из-за увеличения облачности и влажности.

В выборке прослеживается обратная связь между видимостью и UV: чем сильнее запылённость, тем выше UV (за счёт меньшего облачного покрытия и прямой радиации). В пылевых шлейфах аэрозоль рассеивает и поглощает ультрафиолет, однако на самой станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau) при выносах часто сохраняется безоблачное небо, поэтому UV остаётся высоким.

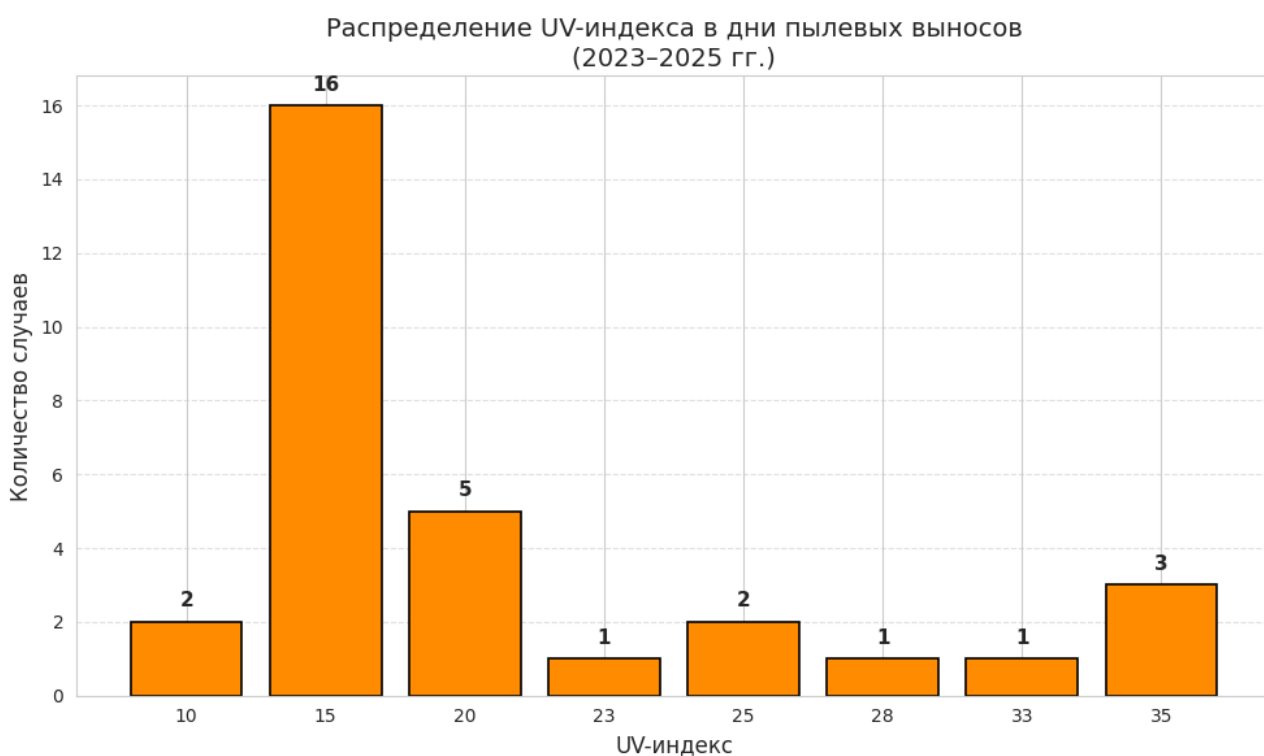


Рисунок 18 – Распределение УФ-индекса в рамках рассмотренных случаев

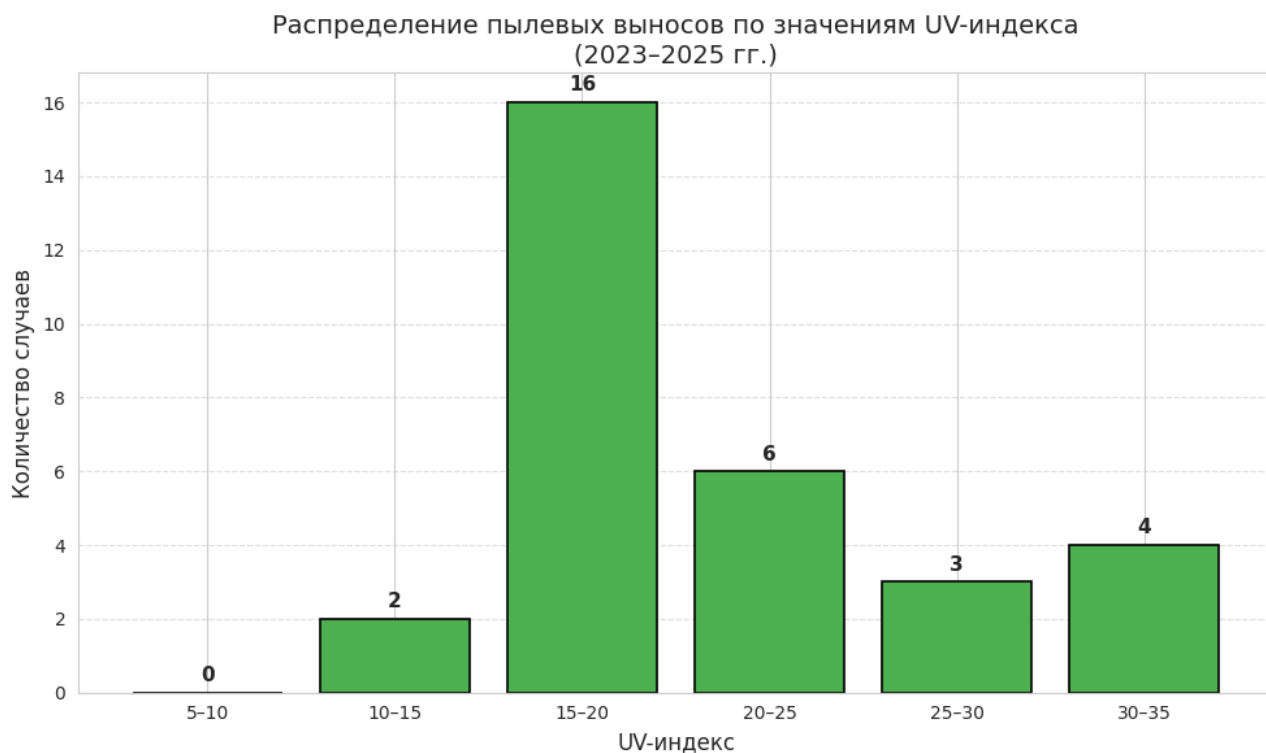


Рисунок 19 – Распределение УФ-индекса в рамках рассмотренных случаев

3.1.4 Длина шлейфа

Наибольшие по длине шлейфы (более 500 км) зафиксированы при устойчивом северо-восточном направлении ветра и наличии низкоструйного течения (см. Таблица 1, Рисунок 21). На Рисунке 20 видно, что низкоструйное течение активизируется в отдельные периоды (январь, февраль, апрель). Короткие шлейфы характерны для влажного сезона и менее интенсивных пылевых случаев обоих сезонов.

Средняя длина шлейфа составляет 363 км, а среднее стандартное отклонение – 154 км, что характеризует длину шлейфа как сильно изменчивую величину. Длина шлейфа зависит от других метеорологических (скорость ветра) и синоптических условий (вертикальная устойчивость атмосферы).

Сухой сезон характеризуется значительно более длинными шлейфами (среднее 384 км) по сравнению с влажным сезоном (среднее 172 км).

Наиболее протяжённый шлейф (736 км) зафиксирован 6 января 2025 года, что соответствует максимальной интенсивности выноса.

Наименьшая дальность (213 км) отмечена 19 мая 2025 года.

Сравнение с литературными данными (Washington & Todd, 2006) показывает, что зафиксированные длины шлейфов типичны для выносов из впадины Боделе, а отдельные рекордные значения (>700 км) соответствуют экстремальным синоптическим ситуациям.[1]

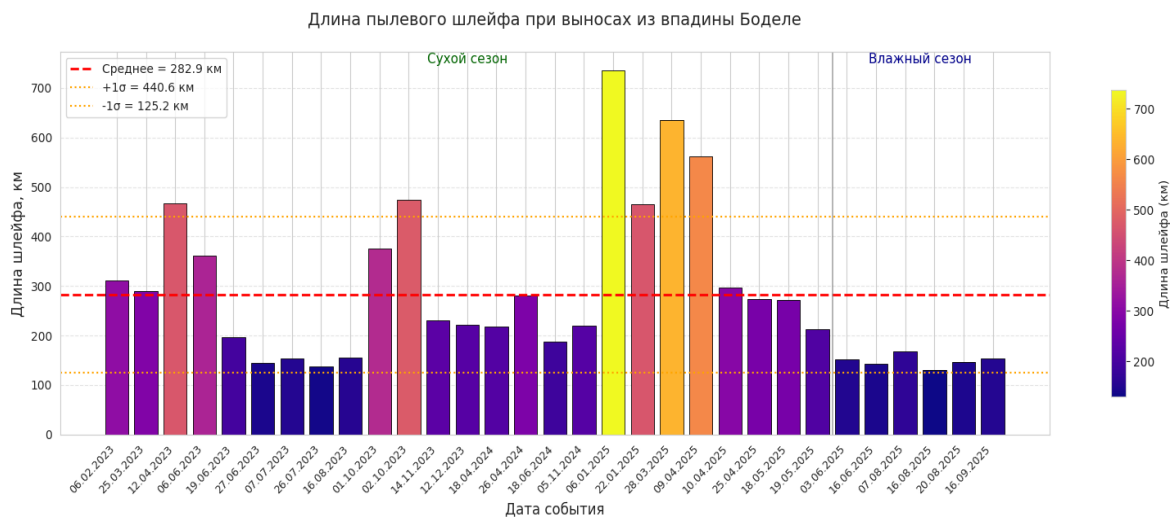


Рисунок 20 – Распределение длин пылевого шлейфа в рамках рассмотренных случаев

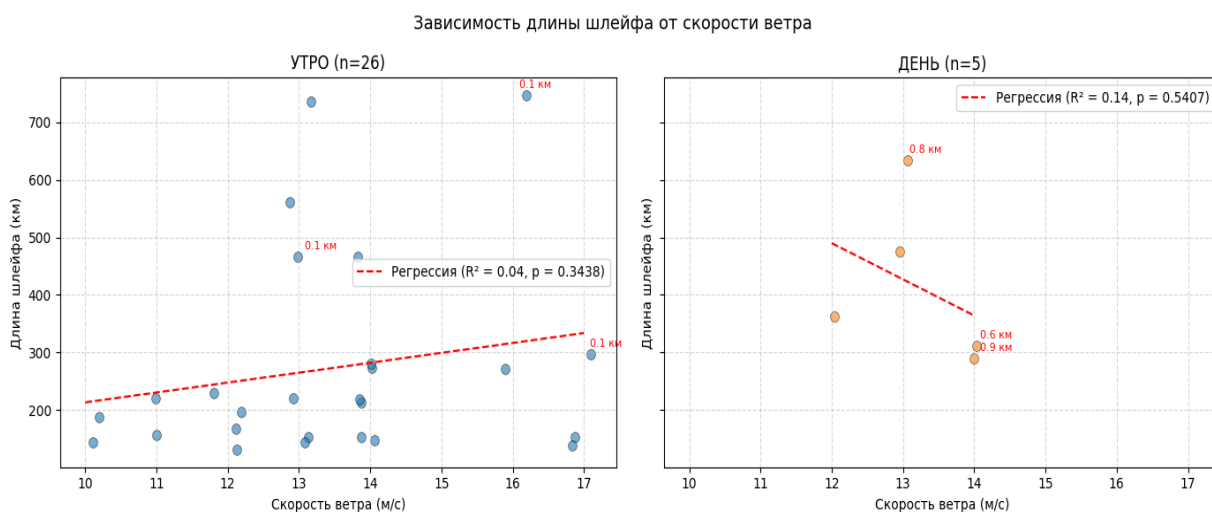


Рисунок 21 – Зависимость длины шлейфа от скорости ветра

3.1.5 AOT/AOD

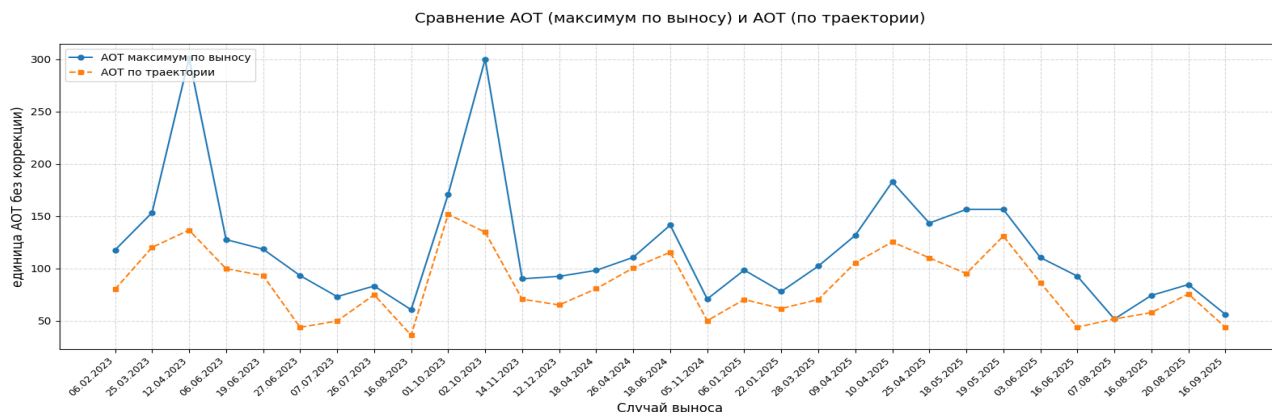


Рисунок 22 – Климатологический ход AOD и сравнение AOD/AOT.



Рисунок 23 – Климатологический ход AOD и сравнение AOD/AOT.

Для объективной оценки интенсивности выносов спутниковые данные MERRA-2 (AOD 550 нм) за 2000–2025 гг. были использованы в качестве климатологического референса. Годовой ход AOD характеризуется двухпиковой структурой: весенний максимум в апреле (0,64) и осенний максимум в октябре (0,55). Минимумы приходятся на ноябрь–декабрь (0,39–0,41) и август–сентябрь (0,42–0,46).

Апрельский максимум совпадает с окончанием сухого сезона, когда почвы максимально иссушены, а харматан наиболее устойчив; октябрьский – с началом действия северо-восточных ветров после муссона, когда растительность ещё не восстановилась.

Рассмотренные в работе выносы были сопоставлены с климатическими нормами для соответствующих месяцев. В апреле скорректированный АОТ_{max} колебался от 0,73 до 1,66, что превышает климатическую норму (0,64) на 14–160 %. В мае (норма 0,69) превышение составило 25–56 %.

В ноябре (норма 0,39–0,40) выносы 2023–2024 гг. дали АОТ_{max} 0,39–0,50, то есть находятся в пределах нормы или незначительно превышают её.

Таким образом, отобранные случаи представляют собой преимущественно аномально сильные пылевые события, особенно в весенние месяцы. Для влажного сезона (июнь–август) скорректированный АОТ_{max}, напротив, часто оказывался ниже климатической нормы (0,70–0,77), что подтверждает ослабление выносов в этот период. (см. Таблица 1, Рисунок 22, 23)

3.1.6 Низкоструйное течение (LLJ)

Анализ роли низкоуровневого струйного течения (LLJ) проводился для утренних случаев (7–9 UTC), когда LLJ максимально выражено. Из 31 зарегистрированного пылевого выноса 26 случая пришлось на утренние часы. В 16 из них (73%) зафиксировано наличие LLJ, диагностированное по ветру на изобарической поверхности 850 гПа (скорость ≥ 12 м/с, северо-восточное направление). (см. Рисунок 24) Это свидетельствует о ведущей роли LLJ в формировании утренних пылевых выносов из впадины Боделе. Оставшиеся 27% могут быть связаны с другими механизмами (например, локальными конвективными вихрями или фронтальным усилением ветра).

Из 31 зарегистрированного случая выноса аэрозоля низкоструйное течение (LLJ) отмечено в 20 случаях, что составляет 64,5%-65% от общего числа.

Из 31 случая выноса сильные выносы (видимость ≤ 1 км) зафиксированы в 17 случаях. В 9 из них присутствовало низкоструйное течение.

В 50% сильных выносов (видимость ≤ 1 км) зафиксировано наличие LLJ (ветер на карте ОТ 850 гПа ≥ 12 м/с, СВ).

Частотное время наблюдения низкоструйного течения – с 7 до 9 ч, и доля LLJ составила почти 73% (16 из 22). (см. Рисунок 15)

Наличие LLJ увеличивает не только приземную скорость ветра (в среднем на 2 м/с), но и вертикальный сдвиг, что способствует подъёму пыли в более высокие слои и её дальнейшему дальнему переносу.

Сравнение с работой Todd et al. (2007) подтверждает, что LLJ является ведущим механизмом для 2/3 крупных выносов из впадины Боделе. [3]

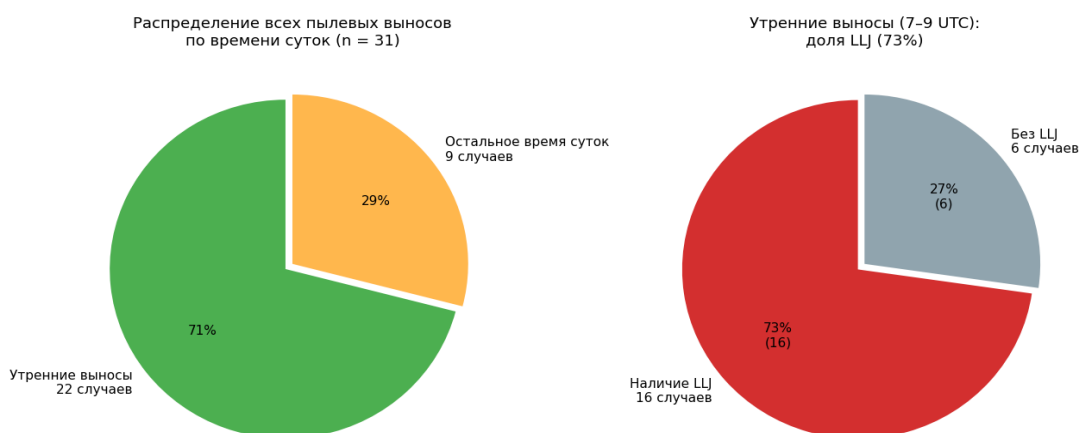


Рисунок 24 – Распределение 31 эпизода пылевого выноса по времени суток с минимальной видимостью (станция Фая-Ларджо)

3.2 Анализ типовых синоптических ситуаций

Если эффект низкоструйного течения (LLJ) наблюдается повсеместно (что доказано на основе исследуемого материала см. пункт 3.2.6.), то существуют синоптические различия для каждого конкретного случая. В ходе работы было определено три паттерна состояния атмосфера над впадиной Боделе.

Для рассмотрения каждого из паттерна задействуются карты реанализа MERRA-2: карты приземного анализа (MSLP/ ветер на уровне 10 м/с), карта на уровне 850 гПа, спутниковый снимок в RGB DUST, VIS, карта аэрозольной оптической толщины (AOD), временной ход на станции за сутки. (см. Таблица 2)

3.2.1 Прохождение классического зимний ветра – Харматтана

Наиболее распространённый сценарий, сопровождающийся пылевыми выносами. Он характерен для зимних и весенних месяцев. Появление ветра обуславливает мощный барический градиент между антициклоном на севере, который устанавливает своё влияние над Средиземным морем и Северной Африкой, и циклоном над юге (относительно рассматриваемого объекта), что покрывает Западную Африку и Гвинейский залив.

Градиент создаёт условия для устойчивого ветра под названием Харматтан. Ветер имеет северо-восточную направленность, что почти точно попадает по направлению орографической трубе между горами Тибести и Эннеди, что и вызывает усиление потока этого ветра над впадиной Боделе (см. пункт 1.3.2.)

Типичные признаки развития паттерна 1: сильный барический градиент, устойчивый ветер северо-восточного направления, частое сопровождение низкоструйного течения, широкий шлейф выноса (веером), низкая видимость, высокие и умеренные показатели индекса AOT/AOD. Сценарий характерен для сухого сезона.

3.2.2 Прохождение холодного фронта и появление волн Кельвина

Случаи данного физического состояния связаны с холодными вторжениями в Сахару. Рассматриваемые случаи носят ситуативный и взрывной характер, менее регулярный. Отрог антициклона над Западной Африкой во время перемещения циклона в сторону юга Европы совместно с прохождением холодного фронта. Этот холодный фронт с зафронтальным холодом блокируется горными массивами (Тибести и Эннеди), что способствует накоплению холодной воздушной массы подле орографического препятствия. Избыток энергии вместе с холодными воздухом создают гравитационную волну, которая, подхватываемая ветром, создаёт ситуацию внезапного и взрывного усиления ветра. Это усиление способствует внезапному и сильному выносу.

Типичные признаки развития паттерна 2: резкое усиление ветра, очень низкая видимость, узкая и компактная полоса пылевого выноса, AOT/AOD экстремально завышен, ветер параллелен горам, бывают кластеры наблюдений повторений пылевых случаев (18 и 19 мая 2025 года, 1 и 2 октября 2023 года (см. Таблица 3).

Появление связано с прохождением холодного фронта, но может проявляться и в сухой сезон.

3.2.3 Летняя конвективная ситуация (влияние хабу́ба)

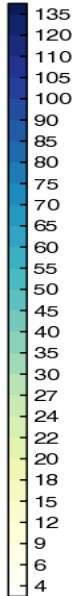
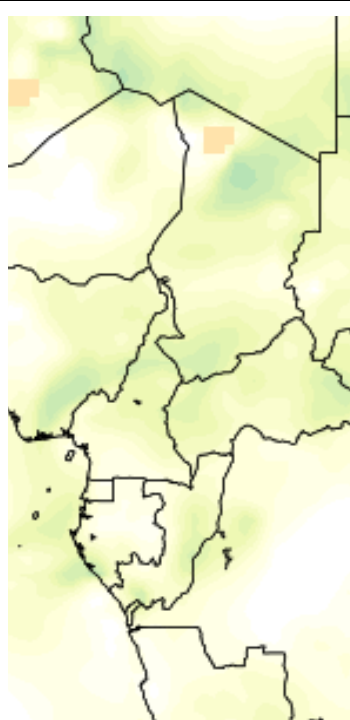
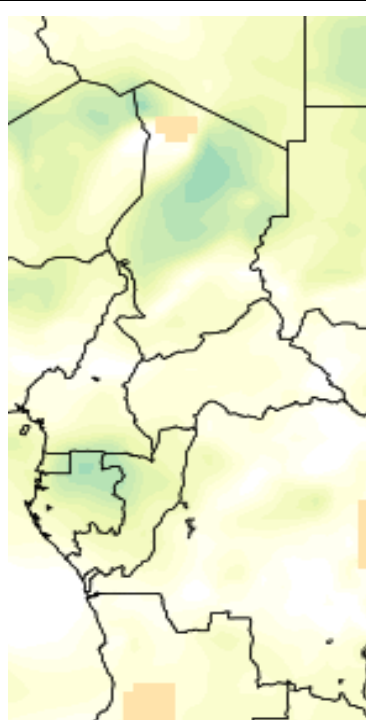
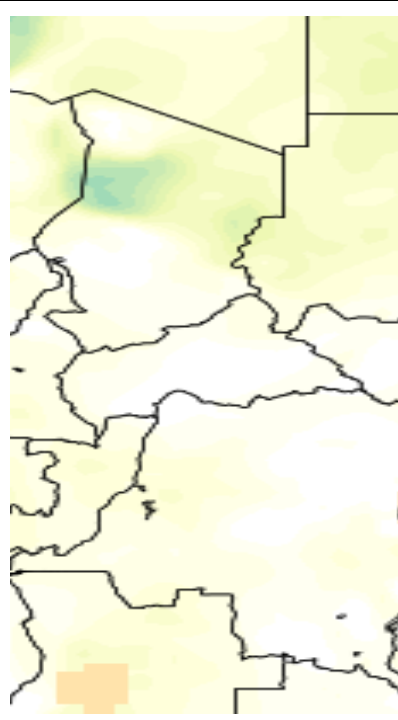
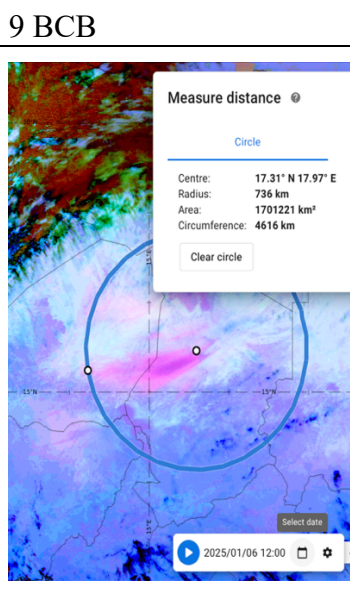
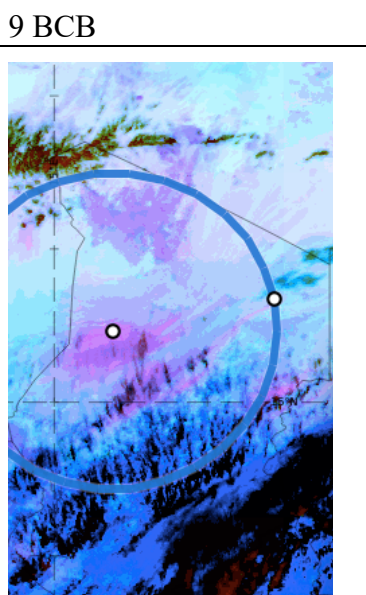
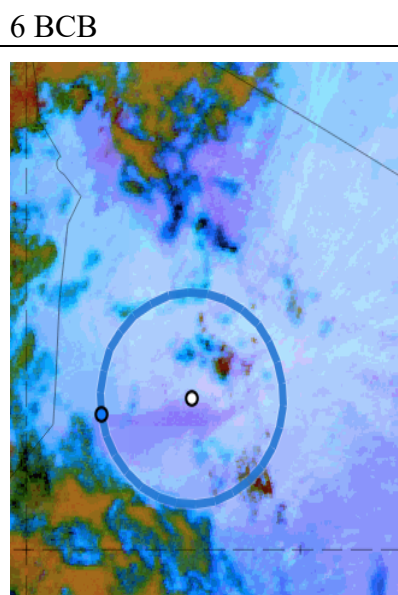
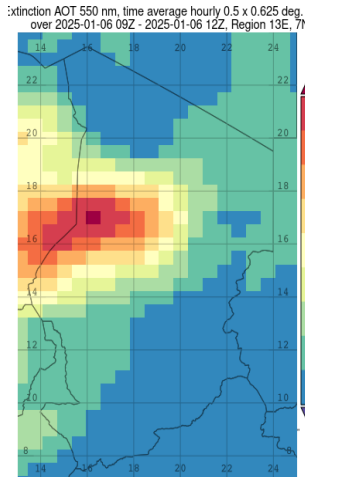
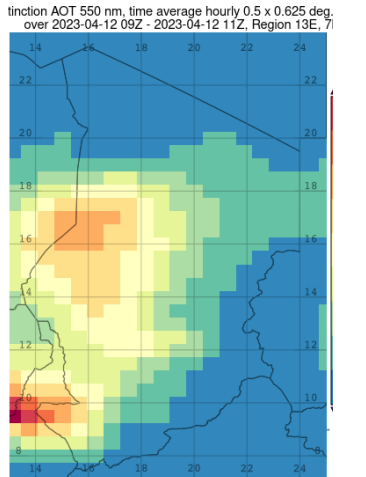
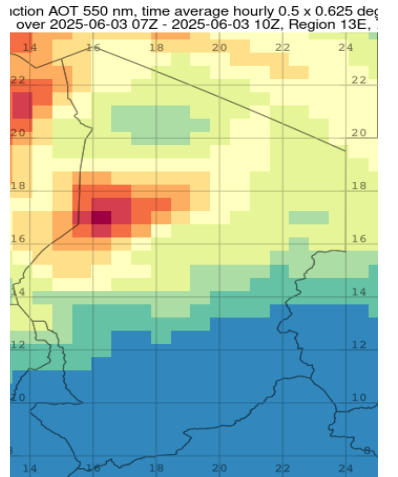
Конвекция – это основной драйвер пылевых бурь во влажный период. Атмосфера над пустынями в летний период сильно прогрет, что обуславливает климатическая норма – поднятие зоны ВЗК выше, на север Африки. Однако несмотря на сухость воздуха и высокую температуру, муссонная влага приводит к развитию мощной конвекции. Особенностью конвекции над пустынными – это редкость случая выпадения осадков ввиду сухости подоблачного слоя (капли испаряются, не долетая до земли). Высокие кучево-дождевые облака благодаря муссонной влаге, не выпавшие осадки делают воздух плотным и холодным. Плотный воздух способен стремительно обрушиваться на землю, что ведёт образованию стены пыли - хабу́ба; так происходит и над областью впадины Боделе: при взаимодействии с орографическим ускорением ветряного потока

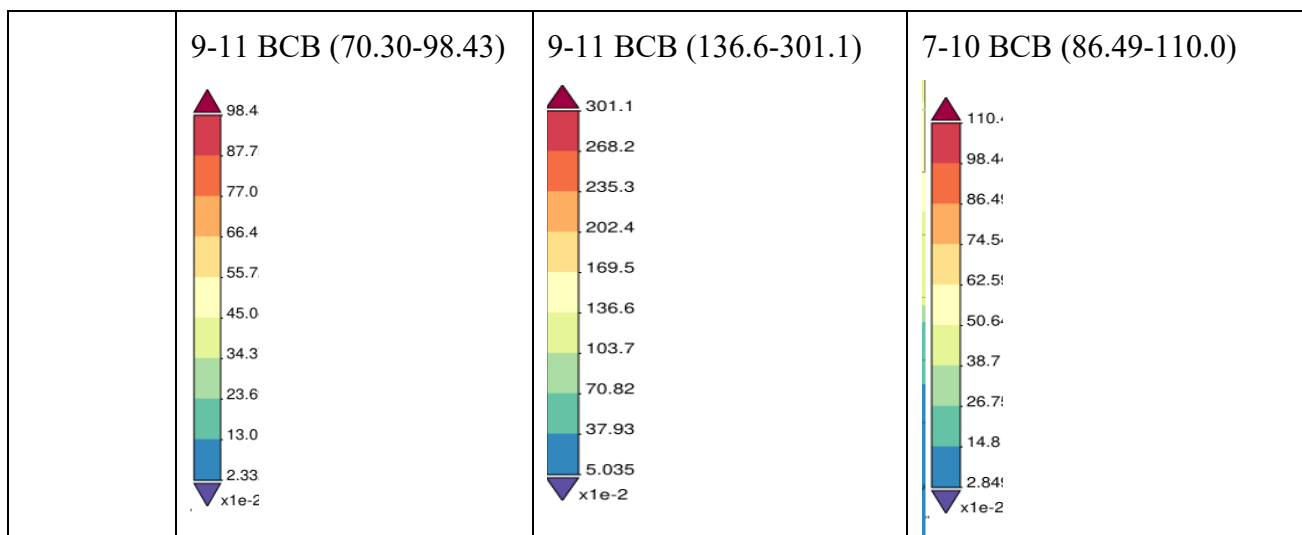
Типичные признаки развития паттерна 3: дугообразный фронт пыли, видимость редко падает ниже 1 км, AOT/AOD значительно ниже показателей сухого сезона, наличие конвективных облаков в округе, порывистый ветер, направление ветра переменчивое. Встречается во влажный сезон: все случаи влажного периода относятся к паттерну 3 (исключением может служить наличие низкоструйного без конвекции, однако, не рассматривается при данном наборе данных)

Рассмотрим случаи, характеризующие три паттерна развития пылевого случая:

Таблица 2 – Сравнение трёх паттернов развития пылевого случая при различных начальных данных

дата/ паттерн	6.01.2025(1 паттерн)	12.04.2023(2 паттерн)	3.06.2025(3 паттерн)
Барическ ие системы 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 [m/s]			
	9 BCB	9 BCB	6 BCB

Ветер на 850 гПа 			
Спутниковый продукт RGB DUST MSG			
	736 КМ ДЛИННЫЙ ШЛЕЙФ	436 КМ	152 КМ
АОТ КОМПОНЕНТ	Extinction AOT 550 nm, time average hourly 0.5 x 0.625 deg. over 2025-01-06 09Z - 2025-01-06 12Z, Region 13E, 71 	Extinction AOT 550 nm, time average hourly 0.5 x 0.625 deg. over 2023-04-12 09Z - 2023-04-12 11Z, Region 13E, 71 	Extinction AOT 550 nm, time average hourly 0.5 x 0.625 deg. over 2025-06-03 07Z - 2025-06-03 10Z, Region 13E, 71 



3.2.4 Промежуточные заключения по синоптическим ситуациям

Таким образом, приходим к следующим заключениям:

- Паттерн 1 характеризуется обыкновенно сопровождением мощного антициклоном над Ливией и «классическим» крупномасштабным градиентом, ветер устойчивый 12-17 м/с и направление не меняет в течении суток, низкоструйное течение рассматривается как часть общего зонального потока, веер выноса стремится на запад в виде плотной струи-реки, облачность практически отсутствует, AOD умеренных и высоких значений, которые формируют «пылевой пояс»

- Паттерн 2 резкий барический гребень, имеет узкую ленту ветра на карте 850 гПа и изобары под острым углом, что характерно для волн Кельвина, часто шквал или порыв, низкоструйное течение в виде мезовихря – орографической волны, вынос разворачивается из взрывного образования с компактным уплотнением в одной точке шлейфа, похожее на распространение дыма от пожара, может быть полоса фронтальной облачности на севере, AOD значения достигают рекордных максимумов

- Паттерн 3 отличим размытым барическим полем, малоградиентом, отсутствие четких фронтов, определяется по близкому нахождению холодных кучево-дождевых наковален над нагорьями, ветер переменный, низкоструйного течения нет или оно размыто, форма напоминает плотный кусок стены небольшого размера, сопровождается мощными кучево-дождевыми башнями,

короткоживущий, локальный всплеск AOD, связанный с конвекцией (см. Таблица 2)

3.2.5 Значения AOD как результирующего элемента для сравнения синоптических ситуаций

Экстремально высокие значения AOT (более 250) и большая длина шлейфа могут указывать на паттерн 2, особенно если AOT над точкой выноса значительно выше среднемесячного (сравнение). Случай второго паттерна 12.04.2023: AOT 301, среднее по апрелю 0.636, - превышение в 2.6 раза. При паттерне 1 тоже могут быть высокие значения, например случай 6.0.2025: AOT 98.43 при среднем 0.433, превышение в 2.3 раза, но абсолютное значение меньше.

3.3 Индексы UV, AOD, AOD с коррекцией. Использование данных реанализа MERRA-2 для количественной оценки пылевых выносов в районе впадины Боделе

Данные дистанционного зондирования Земли и реанализа предоставляют безальтернативную возможность для количественной оценки пылевой нагрузки. В настоящей работе используются продукты глобального атмосферного реанализа NASA MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2), который является первым долговременным реанализом, напрямую ассимилирующим данным измерения MERRA-2 аэрозольной оптической толщи (AOD).

Доступ к данным организован через архивный центр NASA GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) и инструмент онлайн-визуализации GIOVANNI, позволяющий выполнять поднабор данных, строить временные ряды и карты непосредственно в веб-интерфейсе. В рамках визуальных оценок AOT по картам GIOVANNI в районе впадины Боделе (Республика Чад) в период 2023–2025 гг. выполнялся сбор данных о пылевых выносах по следующей методике. Фиксация моментов с максимальной интенсивностью выноса осуществлялась на основе данных о метеорологической

дальности видимости, получаемых с ближайшей к району исследований метеорологической станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau).

Критерием отбора служили эпизоды, в которых видимость снижалась до значений, характерных для пыльных и песчаных выносов (обычно ≤ 5 км). Случаи фиксировались в зимние (декабрь–февраль), весенние (март–май), летние (июнь–август) и осенние (сентябрь–ноябрь) месяцы.

Для каждого эпизода определялись значения аэрозольной оптической толщи (АОТ) двумя способами: максимальный вынос – по пиковому ослаблению излучения в момент наибольшей запылённости, и траекторный вынос – путём интегрирования вдоль предполагаемой траектории воздушной массы, значение ультрафиолетового индекса (UV Index). Также фиксировалась такая информация информация о сроке наблюдения дата, время (местное и UTC), скорость и направление ветра, наличие низкоуровневого струйного течения (LLJ) на изобарической поверхности 850 гПа, а также тип аэрозоля (пыль) и визуальные признаки пылевого события (песчаная буря, низовая метель, обложная пыль (см. Таблица 1)

Для оценки возможности калибровки ручного метода съёма данных по эталонному реанализу. Были произведены следующие работы:

- Выполнен пространственно-временной анализ многолетних (2000–2025) значений AOD на 550 нм для точки 17°N, 18°E, выделить климатологическую норму запыленности.

- Сопоставлены скорректированные визуальные оценки АОТ (максимальный вынос и траекторный – от источника к станции с инструментальными измерениями) с данными реанализа, рассчитать эмпирический поправочный коэффициент и статистические метрики согласия (bias, RMSE, коэффициент корреляции Пирсона).

- Выявлены систематические расхождения между ручным набором данных с веб-источника GIOVANNI и данными MERRA-2 в различные сезоны и для эпизодов разной интенсивности.

- Построен комплекс визуализаций (столбчатые диаграммы среднемесячных значений, гистограммы ошибок, сезонные боксплоты, тепловая карта корреляций) для иллюстрации результатов.

Для качественной оценки пылевых выносов необходимы дополнительные характеристики, - индексы, которые описывают ослабление света при прохождении через толщу воздуха. Эти индексы измеряют оптическую толщину, ультрафиолетовое излучение, используя методику спутниковых алгоритмов и модели реанализа.

Анализ данных над впадиной Боделе послужил наземной проверкой данных реанализа. При помощи математических вычислений были проиллюстрированы инструментальные измерения на местности.

Для использования индексов были использованы три необходимых компонента: GIOVANNI, NASA GES DISC, MERRA-2

NASA GES DISC – это архив данных, который был использован в качестве основы для программного обеспечения анализа данной работы.

MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2) – глобальный реанализ, который объединяет спутниковые наблюдения и наземные измерения в единую мировую модель.

GIOVANNI – веб-приложение для просмотра в реальном времени интересующих карт и анимаций. [23, 24, 27]

3.3.1 UV index

УФ-индекс – это международный стандарт, который в виде простого числа показывает силу воздействия ультрафиолетового излучения. Этот параметр связан с наиболее валидным индексом для данного исследования – AOT/AOD – таким образом, что UV INDEX служит косвенным показателем плотности пылевого облака.

Если максимальные значения UV INDEX достигается тогда, когда атмосфера свободна от взвесей, сухая, то при наличии пустынной пыли

ультрафиолет и его поступление на поверхность Земли значительно уменьшается, что приводит к снижению показателя.

В таблице (см. Таблица 2) с собранными случаями в пыльных условиях достигает 15–35, что говорит об интенсивности ультрафиолетового излучения до пылевого выноса и важности этих данных. Это говорит о том, что в момент фиксирования облако пыли ещё не успело полностью закрыть солнце, и были отмечены фоновые экстремальные значения для этой местности.

Для работы были сняты показания с веб-карты на портале GIOVANNI, продукт: OMI/Aura Near UV Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo L3 1 day 1.0 degree x 1.0 degree V3 (OMAERUVd).

Для каждого случая была сгенерирована карта под заданные координаты (13.0, 7.0, 25.0, 24.0., в дальнейшем они же будут использоваться для снятий показаний AOT/AOD) и месяц для каждого пылевого выноса. (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

К каким выводам привели результаты рассмотрения UV INDEX (по данным MERRA-2) совместно с AOT/AOD:

- Исходный уровень УФ-индекса высок, что обусловлено низкой широтой и большой высотой Солнца, низким содержанием влажности.

- В момент пылевых случаев значение индекса уменьшается на 30-60% (с ожидаемых 15–18 до 5–10)

- Существует обратная корреляция между значениями AOD и поверхностным UV INDEX, что позволяет использовать простые УФ-метры для оценки запылённости в реальном времени.

- В отличие от AOD, который в пыльных условиях растёт, поверхностный UV Index снижается из-за поглощения и рассеяния ультрафиолета пылью. Однако в отдельных случаях (например, 10.04.2025) зафиксировано повышение UV Index до 25 единиц, что объясняется многократным рассеянием: часть ультрафиолета, рассеянная пылью вниз, увеличивает поток у поверхности. Такой эффект пылевого усиления наблюдается при высокой оптической толщине ($AOD > 1,0$).

Таким образом, впервые для впадины Боделе была выполнена количественная оценка связи между пылевыми AOD (AOT) и поверхностным UV-индексом.

3.3.2 AOT/AOD

AOT/AOD — это безразмерная мера того, насколько сильно аэрозоли в атмосферном столбе (от земли до космоса) ослабляют прямой солнечный свет. Это интегральная характеристика, которая показывает, сколько света было либо рассеяно, либо поглощено частицами.

Расчёт аэрозольной оптической толщи (AOT/AOD) основан на законе ослабления солнечного излучения в атмосфере (Бугера — Ламберта — Бера). [35].

Для монохроматического излучения зависимость ослабления от количества вещества описывается экспоненциальным законом:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp \left[(-\tau(\lambda) \cdot m) \right] \quad (3.1)$$

где:

$I_0(\lambda)$ - интенсивность на верхней границе атмосферы; ((Вт/м²)/ (Вт/(м²·нм)))

$\tau(\lambda)$ -общая оптическая толщина атмосферы;

m - воздушная масса ($m = \sec \theta_z = 1/\cos \theta_z$, где θ_z — зенитный угол Солнца. При $\theta_z = 0$ ($\theta_z = 0$ (Солнце в зените) $m = 1$ $m=1$.)

Аэрозольная оптическая толщина – это составляющая $\tau(\lambda)$, обусловленная только аэрозолями:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_t(\lambda) - \tau_r(\lambda) - \tau_g(\lambda) \quad (3.2)$$

где:

$\tau_r(\lambda)$ – молекулярное рассеивание (релеевское)

$\tau_g(\lambda)$ – поглощение газами

*Все члены приведены для одной длины волны, τ и m – безразмерны, вклад газов $\tau_g(\lambda)$ часто исключается выбором «атмосферных окон» прозрачности.

АОТ и AOD – это набор чисел на каждой длине волны, которые показывают, насколько сильно атмосфера ослабляет солнечный свет. На практике такую оптическую толщину получают двумя основными способами.

Спутниковыми алгоритмами решают обратную задачу — по тому, как изменился солнечный свет после прохождения сквозь атмосферу, восстанавливают значение AOD. Моделями реанализа (MERRA-2) ассимилируют спутниковые и наземные данные для создания глобальной, физически непротиворечивой картины.

Для работы были использованы данные с GIOVANNI для АОТ:

(продукт: MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4 (M2T1NXAER))

и архивы с NASA GES DISC для AOD:

(продукт: Dust Scattering AOT 550 nm – PM 1.0 μm . time average (M2T1NXAER v5.12.4))

3.3.3 Набор данных для рассмотрения индекса АОТ

Данные АОТ выбирались вручную путём скачивания карт для каждого случая, опираясь на наземные наблюдения станции Файя-Ларжо (Faya-Largeau), акцентируя внимание на часы выноса (по средствам определения скорости ветра, видимости и явлений). (см. Таблица 1)

Для АОТ собирались отдельно в таблицу значения максимального значения АОТ и значения по траектории от источника (впадина Боделе) до станции (Фая-Ларжо). (см. Рисунок 25, см. Таблица 1)

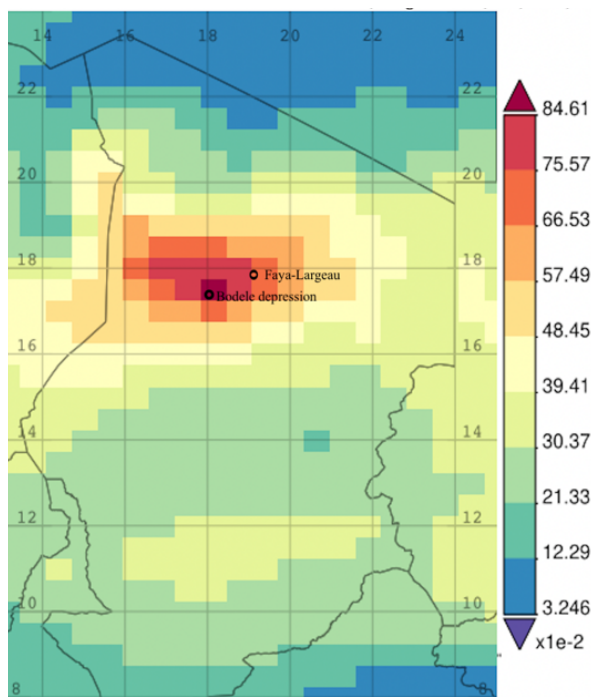


Рисунок 25 – Визуальная оценка траектории от предполагаемого места выноса до станции на сгенерированной карте с значениями АОТ за 20 августа 2025 г.

3.3.4 Рассмотрение климатологических показателей

Далее необходимо было сравнить средние данные глобальных гридированных полей с климатическими данными (2000-2025 гг.) и средним значениями по месяцам за 2023 г., 2024 г., 2025 г. Эти расчёты потребовали вычислений при помощи среды разработки программного продукта.

При помощи данных архива NASA GES DISC был разработан алгоритм для получения климатических значений AOD, построения графиков. Основная сложность использование этих данных – в их объёмности и сложности интерпретации. Для каждого месяца за период существует архив необходимых значений в формате .nc4, что представляет трудности при открытии объема – 313 файлов.

Каждый такой файл содержит измерения (переменные) на регулярной глобальной сетке. В нашем случае это была сетка с разрешением 0.5° по широте и 0.625° по долготе. Файлы имеют стандартизированное имя, которое включает в себя год и месяц. Например: MERRA2_400.tavgM_2d_aer_Nx.200001.nc4. Для извлечения массива описанного массива, происходит загрузка этих данных в

среду Python при условии: авторизации в системе Earthdata Login, осуществлении проделанной работы с поиском необходимой для расчёта переменной (в случае данного исследования TOTEXTAU), заблаговременным скачиванием результирующего набора необходимых файлов.

3.3.5 Алгоритм преобразования климатологического архива

1. Первичное преобразование: чтение и извлечение временного ряда. Для чтения NetCDF файлов была использована библиотека `xarray`. Извлечение временного ряда AOD для заданной точки методом ближайшего соседа:

```
(.sel(lat=..., lon=..., method='nearest')).
```

2. Построение многолетних средних. Необходимость в получении нормированных значений осуществлялась при помощи библиотек `pandas`. Делаем преобразование извлечённого AOD в `DataFrame` с колонками `year`, `month`, `AOD`.

3. Группировка данных по номерам месяцев (1–12) с расчётом среднего арифметического:

```
climatology = df[df['year'] < 2025].groupby('month')['AOD'].mean().
```

4. Получаем результат — массив из 12 чисел, каждое из которых есть среднемесячный AOD за период 2000–2025.

5. Используя библиотеку `matplotlib.pyplot`, соединили 12 точек среднемесячных значений AOD линией с маркерами, создав четкую и информативную визуализацию.

3.3.6 Сравнение снятых вручную АОТ и посчитанных компьютером AOD

Взятые с карт АОТ оказались непригодны для сравнения со данными MERRA-2 другого продукта AOD, поскольку не совпадала размерность измерений взятых спутниковых продуктов.

Следующим шагом стало приведение к масштабу. Поскольку значения АОТ были порядка 30–300, а AOD, снятый с данных реанализа – 0,3–0,9 (в среднем 0,5), было обнаружено, что «сырые» значения АОТ пересчитываются по

формуле $AOD = AOT / 1000 \times k$, где $k = 0,767$ » относительно показаний реанализа.

Для качественной оценки был рассчитан поправочный коэффициент $k = sat_aod / (AOT/1000)$ и применён к обеим сериям измерений (где sat_aod - измерение AOD от MERRA-2).(см. Таблица 1)

3.3.7 Алгоритм коррекции AOT

1. Перевод сырых AOT в «сырой AOD» делением на 1000:
2. $raw_AOD = AOT / 1000$
3. - Для каждого визуального измерения находим реанализ sat_AOD за тот же месяц и год.
4. - Вычисляем поправочный коэффициент k как среднее отношение sat_AOD / raw_AOD по всем измерениям:
5. $k = (sat_AOD / raw_AOD). mean()$
6. ($k = 0,767$ для траекторных AOT и аналогично для максимальных выносов).
7. - Получаем скорректированные значения:
8. $AOD_corr = raw_AOD * k$

Этот коэффициент позволяет сделать визуальные оценки AOT сопоставимыми с реанализом в абсолютных единицах AOD. (см. Рисунок 26, ПРИЛОЖЕНИЕ 5)

3.3.8 Метрики, полученные по результатам сравнения скорректированного AOT и данных реанализа AOD

Для количественной оценки согласия визуальных оценок AOT и данных реанализа AOD были рассчитаны несколько статистических метрик. Абсолютное отклонение определялось как разность между скорректированным значением AOD (AOD_corr) и данных реанализа AOD (sat_AOD), а относительное отклонение вычислялось в процентах от данных ретроперспективного анализа. Дополнительно оценивались коэффициент

корреляции Пирсона между рядами AOD_corr и sat_AOD, среднее смещение (bias), среднеквадратичная ошибка (RMSE) и стандартное отклонение разности.

Визуализация результатов выполнялась автоматически с использованием библиотек matplotlib и seaborn; все построенные графики (временные ряды, столбчатые диаграммы среднемесячных значений, гистограммы отклонений, сезонные boxplot и тепловая карта корреляций) сохранялись в формате PNG.

Такой подход позволил наглядно представить степень согласия между вузальными и глобальными гридированными данными и выявить сезонные особенности расхождений.

В результате выполнения разработанной программы были получены выходные данные (см. Рисунок 26, ПРИЛОЖЕНИЕ 3,4)

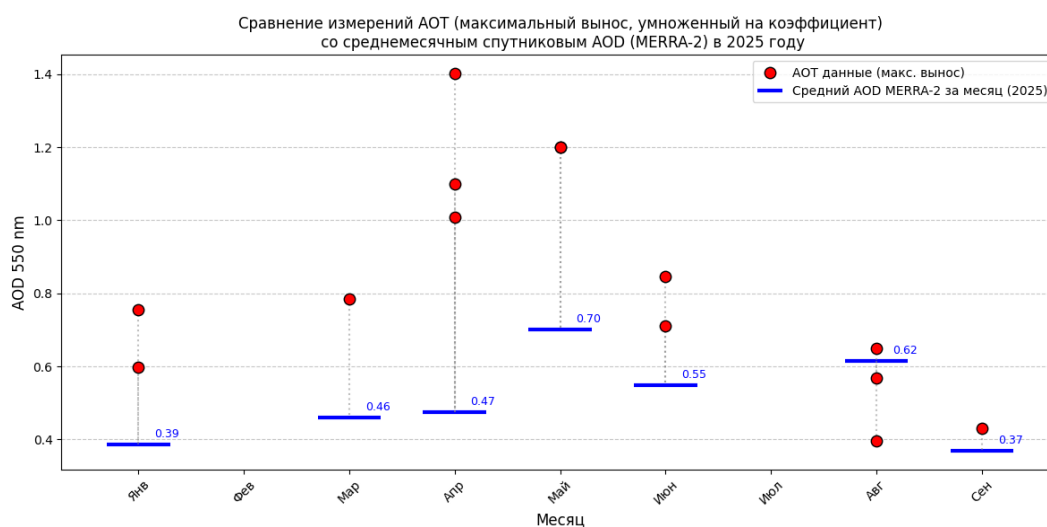


Рисунок 26 – Сравнение измерений АОТ с корректировкой по выведенному коэффициенту со среднемесячным показанием снятого со спутника индекса АОД

3.3.9 Сравнительный анализ полученных результатов

На основе выполненных визуализаций установлено, что скорректированные визуальные оценки АОТ систематически завышены относительно данных АОД от MERRA-2 в среднем на 0,131 (16 % (max), 14 % (traj)). (ПРИЛОЖЕНИЕ 2)

Коэффициент корреляции Пирсона между рядами составил 0,34-0,37, что подтверждает умеренное согласие после введения поправочного коэффициента. (ПРИЛОЖЕНИЕ 2)

Наибольшие расхождения (до 102%) наблюдаются в апреле – месяце климатологического максимума AOD, тогда как летом фиксируются эпизоды занижения визуальные значений (до –58%).

Распределение отклонений асимметрично (71% отклонений положительны), а средняя абсолютная относительная ошибка по выборке из 31 пылевого эпизода составляет 34%, что признаётся приемлемым для ручного метода измерения запылённости впадины Боделе. (ПРИЛОЖЕНИЕ 3)

Таким образом, индивидуальные отклонения сильно варьируют в зависимости от сезона и интенсивности пылевых событий.

Наибольшие превышения (>70%) зафиксированы в апреле 2025 и октябре 2023 – месяцах с максимальной пылевой активностью (AOT_{traj.} 105–152). Пример: случай №7 (апрель 2025, AOT=125,3) – значение визуального наблюдения на 0,486 выше рестроперспективного анализа, относительное отклонение 102%.

Сильные занижения (–58%...–36%) наблюдаются в летние месяцы (июнь–август) как в 2023, так и в 2025, при относительно низких AOT (36–58). Например, август 2023 (AOT=36,2) – значение визуального наблюдения ниже восстановленных полей, а на 0,384 (отн. –58%).

Хорошее согласие (отклонение <10%) встречается в основном в мае 2025 (оба случая), июне 2023 (два случая) и ноябре 2024.

Вероятные причины расхождения результатов измерения могут заключаться в: пространственно-временном несовпадении, разнице в методике восстановления, влиянии облачности или влажности.

3.3.10 Качественное и качественная оценка типа аэрозоля и протяженность пылевых шлейфов

Одним из столбцов таблицы посвящено определение типа выносимого аэрозоля. Во всех рассмотренных случаях типом аэрозоля стал песок.

Для этого использовался источник WORLVIEW (инструмент NASA), данные были получены при помощи данных VIIRS Deep Blue Aerosol Type; алгоритмы этого спектрального метода предназначены для работы над снимками из аридных регионов, чтобы точно определить природу аэрозоля. Из спектрального анализа можно идентифицировать: пыль, дым от пожаров, морскую соль, промышленные выбросы. (см. Рисунок 26, 27)



Рисунок 27 – Скриншот с сайта <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>, определяющий тип аэрозоля в толще воздуха; тип – песок

Отображение на карте принимает такой вид:

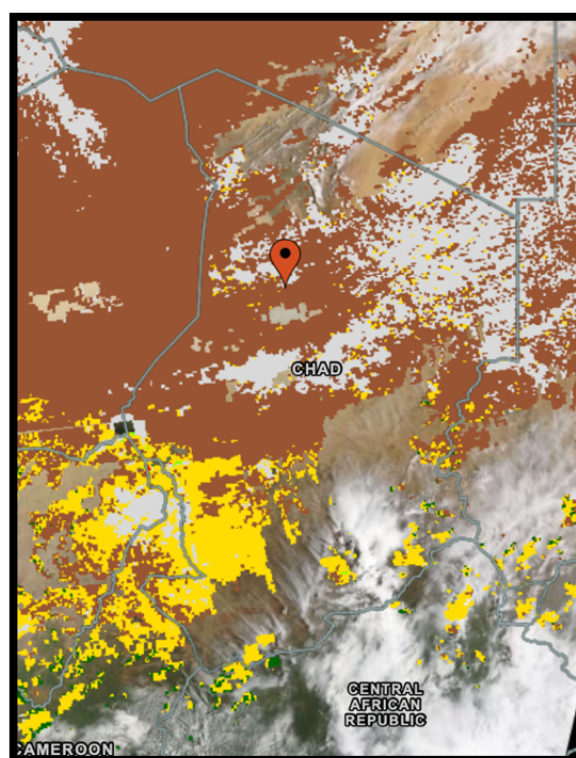


Рисунок 28 – Качественный показатель аэрозольного выноса над впадиной Боделе 7 апреля 2025 года (песок)

Для количественной оценки горизонтальной протяжённости пылевых шлейфов использовался инструмент «Measure distance» в программном обеспечении сервиса ePort (EUMETRAIN). Измерения проводились по композитным RGB-изображениям, в частности, по продукту Dust RGB MSG

спутника, на котором пылевые массы имеют характерную розово-фиолетовую окраску.

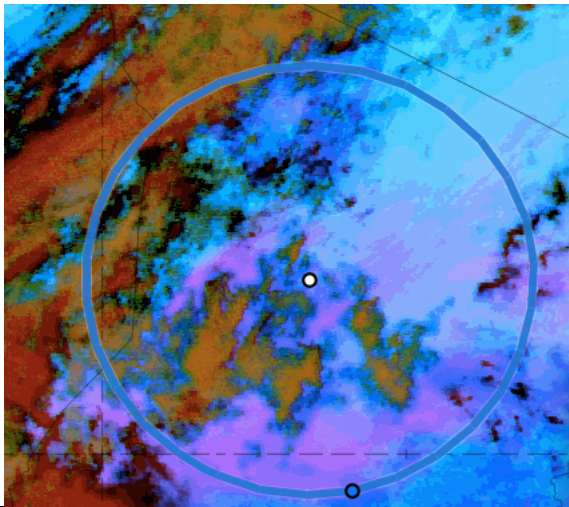
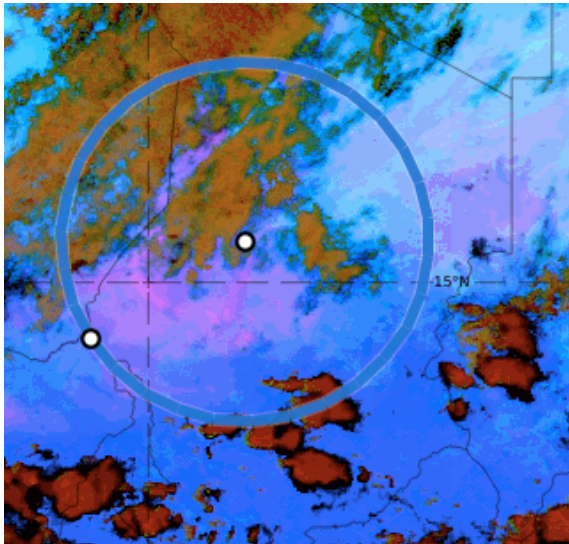
Измерение происходит на основе автоматического измерения радиуса от точки выноса до точки, где предположительно пылевой вынос переходит из четкой и контрастной структуры в размытую форму: от предполагаемого центра источника (впадина Боделе) до наиболее удалённой точки, где шлейф ещё уверенно идентифицировался визуально. (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 6)

Среднее расстояние пылевого выноса в сухой сезон составляет 400 км, а во влажный 200 км.

Максимальная концентрация пыли по определяемым показателям одного дня не обязательно становится днём, когда пыль имеет дальнюю траекторию. Так получилось, например, в смежные дни пылевой бури сухого сезона 1 и 2 октября 2023 года; 1 октября наблюдался мощный пылевой случай, в то время как 2 октября, когда буря стала меньше по количественным показателям (см. Таблица 1), но день стал примечателен дальностью выноса аэрозоля в сопоставлении с предыдущим днём. Для сравнения, 1 октября 2023 года вынос составил примерно 376 км, а 2 октября 2023 года примерно 475 км. Такое парадоксальное явление объясняется разницей между объёмом поднятой пыли и её транспортной способностью.

Должно быть соблюдено одно из следующих условий: после основного выноса часть пыли попало в более высокие слои, что обусловило движениям частиц высотными ветрами на дальние расстояния; низкоструйный ветер не максимальный по скорости, но способный развить конвекцию или способный на взаимодействие с другими конвективными системами, также передаёт токи для подъема аэрозоля в верхние слои атмосферы. Известно, что для дальних перемещений необходим подъем выше 3 км, что вероятно случилось и в данном случае с 1 на 2 октября 2023 года. (см. Таблица 3) [36]

Таблица 3 – Кластер из двух пылевых событий, характерный второму паттерну синоптической ситуации по вышеприведённой классификации

Дата	Снимок	Расстояние	Количественный вынос по AOD
1.10.23 9 UTC		376 км	0,94
2.10.23 15 UTC		475 км	1,66

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена комплексному анализу пылевых выносов из впадины Боделе (Республика Чад) – крупнейшего источника минеральной пыли на Земле. Исследование выполнялось на основе данных дистанционного зондирования (спутник MSG, MERRA-2, GIOVANNI), синоптических материалов и метеорологических наблюдений станции Файя-Ларжо за период 2023–2025 гг.

В первом разделе систематизированы теоретические основы физики атмосферных аэрозолей: механизмы пылеобразования (солтация, суспензия, крипинг), прямое и косвенное радиационное воздействие минеральной пыли, её роль в формировании ядер конденсации и льдообразования. Выполнен обзор спутниковых продуктов и инструментов дистанционного пылевого мониторинга, часть из которых были применены в работе.

Во втором разделе приведена природно-климатическая характеристика впадины Боделе: диатомитовый субстрат дна бывшего озера Чад как основной источник аэрозольного материала, роль горных массивов Тибести и Эннеди в формировании низкоуровневого струйного течения (LLJ), сезонность режима местного ветра – харматана.

Третий раздел содержит оригинальную аналитическую часть работы. Основные результаты, полученные по выборке из 31 зарегистрированного случая пылевого переноса, представлены ниже.

Метеорологические условия выносов. Во всех 30 из 31 рассмотренного случая (97 %) преобладало северо-восточное или востоко-северо-восточное направление ветра (харматан). Скорость ветра у поверхности в 85 % эпизодов составляла 10–15 м/с. Большинство выносов (26 из 31, 84 %) зафиксированы в утренние часы (7–10 UTC), что согласуется с суточным циклом усиления LLJ после его ночного максимума и последующей передачей импульса к поверхности. Видимость снижалась ниже до 1 км и ниже (≤ 1 км) —(58 %), экстремальные значения (0,1–0,5 км) сопряжены со скоростью ветра 13–17 м/с. Фиксировавшиеся метеорологические явления распределились следующим

образом: низовые метели и обложная пыль (WW 07–09) — около 55 % случаев, пыльные и песчаные бури (WW 30–35) — около 45 %.

Ультрафиолетовый индекс. В 22 из 33 точно определённых значений (67 %) UV-индекс находился в диапазоне 15–20. Наибольшие значения (25–35) приходятся на весенние месяцы сухого сезона; наименьшие (≤ 10) — на влажный сезон (июнь–август).

Низкоуровневое струйное течение (LLJ). LLJ зафиксировано в 20 случаях из 31 (65 %). Среди утренних эпизодов его доля возрастает до 73 % (16 из 22). Установлено, что наличие LLJ увеличивает горизонтальную протяжённость пылевого шлейфа в среднем в 1,4 раза относительно случаев без LLJ, что подтверждает его ключевую роль в транспорте аэрозоля на мезомасштабные расстояния.

Горизонтальная протяжённость шлейфов. По данным дешифрирования снимков Dust RGB (ePort/EUMETRAIN) для 31 случая среднее значение длины шлейфа составило 363 км ($\sigma = 154$ км). В сухой сезон средняя длина (363 км) примерно вдвое превышает таковую для влажного сезона (около 200 км по оценкам в разделе 3.5). Максимальная зафиксированная протяжённость — 736 км (6 января 2025 г.), минимальная — 213 км. Наблюдается парадоксальный эффект: день с наибольшей интенсивностью пылевого события не всегда совпадает с днём максимальной дальности переноса — пыль, поднятая в верхние слои атмосферы, может переноситься высотными ветрами дальше, чем в дни с бóльшим поверхностным потоком.

Синоптические паттерны. По результатам анализа синоптических ситуаций выделено три характерных типа. Паттерн 1 (мощный антициклон над Ливией, зональный градиент): устойчивый ветер 12–17 м/с, LLJ — часть зонального потока, шлейф направлен на запад в виде плотной струи, AOD умеренных и высоких значений. Паттерн 2 (резкий барический гребень, квазикельвиновые волны): взрывная эмиссия из компактного центра, AOD достигает рекордных значений (например, AOT = 301 при среднеапрельском норме 0,636 — превышение в 2,6 раза). Паттерн 3 (малогradientное поле,

конвективные системы над нагорьями): локальный кратковременный всплеск AOD без выраженного LLJ.

Климатологический ход AOD (2000–2025). По данным MERRA-2 для точки 17°N, 18°E выявлена двухпиковая сезонная структура с весенним максимумом в апреле–мае (AOD 0,64–0,69) и летним максимумом в июле (AOD 0,77), разделёнными незначительным летним спадом. Осенью AOD снижается до 0,52–0,56 (октябрь), минимум приходится на ноябрь–январь (0,39–0,43). Рассматриваемые пылевые эпизоды весны 2025 г. превышают многолетнюю климатологическую норму в диапазонах от 14 до 160 %, что свидетельствует об их аномальной интенсивности.

Калибровка визуальных оценок AOT относительно MERRA-2. Визуальные оценки AOT, снятые с карт GIOVANNI, оказались систематически несопоставимы по размерности с данными реанализа AOD. После приведения к единому масштабу (деление на 1000) рассчитан эмпирический поправочный коэффициент $k = 0,767$, позволяющий перевести сырые визуальные оценки в абсолютные значения AOD. Для 31 эпизода получены следующие статистические метрики согласия скорректированных AOT с реанализом: среднее смещение (Bias) = 0,091, RMSE = 0,312, среднее относительное смещение 16 % для максимальных и 14 % для траекторных оценок. Коэффициент корреляции Пирсона между скорректированными визуальными значениями и данными реанализа составил $r = 0,37$ для максимальных и $r = 0,34$ для траекторных оценок (оба значимы или близки к порогу значимости при $n = 31$, $\alpha = 0,05$; $r_{кр} = 0,355$). Умеренная корреляция указывает на принципиальную сопоставимость ручного метода с реанализом, при этом индивидуальные отклонения существенно варьируют в зависимости от сезона и интенсивности эпизода: наибольшие завышения (до 102 %) характерны для апрельских и октябрьских случаев с максимальной пылевой активностью, занижения (до –58 %) — для летних случаев с малыми значениями AOT.

Тип аэрозоля. По данным VIIRS Deep Blue Aerosol Type (NASA Worldview) во всех 31 рассмотренных случаях тип выносимого аэрозоля идентифицирован как пыль/песок минерального происхождения.

Таким образом, установлено, что пылевые выносы из впадины Боделе носят устойчивый синоптический характер: 97 % случаев реализуются при северо-восточном ветре, 84 % — в утренние часы, LLJ выступает ключевым фактором, контролирующим дальность переноса. Сезонная динамика AOD подтверждает двухпиковую структуру с весенним и летним максимумами, а рассмотренные эпизоды существенно превышают климатологическую норму. Разработанная методика калибровки визуальных оценок АОТ через поправочный коэффициент обеспечивает их сопоставимость с реанализом MERRA-2 на уровне, приемлемом для оперативного мониторинга, хотя точность метода ограничена пространственно-временным несоответствием между визуальным снятием данных и гридированным реанализом.

Полученные результаты формируют количественную основу для разработки прогностических схем интенсивности пылевых бурь в регионе впадины Боделе и могут быть использованы при валидации региональных моделей переноса аэрозоля.

Список использованной литературы

1. Абдалла Хияр Абдалла. Синоптико-статистическое исследование условий возникновения гроз и пыльных бурь в аэропорту Хартум и возможности краткосрочного прогноза этих опасных для авиации явлений [Текст]: автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.09. – СПб., 1994. – 16 с.
2. Аширова Д. Р. Обработка и анализ статистических данных с помощью языков программирования Python и R // Цифровая трансформация – шаг в будущее: материалы V Международ. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Минск: БГУ, 2024. – С. 130–132.
3. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология [Текст]: учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 513 с.
4. Глушко А. Я., Разумов В. В., Рейхани М. Д. Деградация земель юга европейской части России под воздействием пыльных бурь // Юг России: экология, развитие. – 2010. – № 1. – С. 148–154
5. Говорушко С. М. Современные проблемы опустынивания, деградации земель и засух в контексте деятельности КБО ООН: 30 лет развития [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-problemy-opustynivaniya-degradatsii-zemel-i-zasuh-v-kontekste-deyatelnosti-kbo-onn-30-let-razvitiya> (дата обращения: 20.05.2026).
6. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2013.
7. Диатомиты Сисианского месторождения [Электронный ресурс] : геологическое описание. – URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2022/12/37968.pdf> (дата обращения: 20.02.2026).
8. Ивлев Л. С. Аэрозоли и глобальные изменения климата [Электронный ресурс] // Terra Humana. – 2009. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerozoli-i-globalnye-izmeneniya-klimata> (дата обращения: 23.03.2026).

9. Ивлев Л. С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение [Электронный ресурс] // Биосфера. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 185–209. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanizmy-obrazovaniya-i-raspada-atmosfernyh-aerozoley-i-oblachnosti-i-ih-ekologicheskoe-znachenie> (дата обращения: 23.03.2026).
10. Иргалеев А. А. Кавитационное разрушение жидкостей [Электронный ресурс] // Интерактивная наука. – 2022. – № 3 (68). – С. 12–15. – DOI: 10.21661/r-556834. – URL: <https://interactive-science.media/ru/article/556834/> (дата обращения: 20.03.2026).
11. Метеорологическое обеспечение авиации [Электронный ресурс] : учебное пособие. – URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-210121947.pdf (дата обращения: 07.04.2026).
12. Панина Л. В. Аридные и семиаридные области. Геоморфологические методы [Электронный ресурс]: лекция № 11 по курсу «Геоморфология» // Teach-in: лекции и конспекты. – URL: <https://teach-in.ru/lectures-conspects/geomorphology-M-lecture11.pdf> (дата обращения: 05.04.2026).
13. Смаилов Ф. Аэрозоли и климат [Электронный ресурс]. – Баку, 2023. – URL: https://aem.az/uploads/files/2023-05/1685478551_1679997402_smailov-fazil-kniqa-1.pdf (дата обращения: 13.03.2026).
14. Турунцева М. Ю. Инструменты оценки качества прогнозов показателей экономической деятельности организаций // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. – 2011. – № 4. – С. 3–22.
15. Центр всемирного наследия. Природно-культурный ландшафт горного плато Эннеди [Электронный ресурс] // UNESCO World Heritage Centre. – URL: <https://whc.unesco.org/ru/list/1475> (дата обращения: 05.04.2026).
16. Bristow C. S., Drake N., Armitage S. Deflation in the dustiest place on Earth: The Bodélé Depression, Chad // Geomorphology. – 2009. – Vol. 105, No. 1-2. – P. 50–58. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.12.014.

17. Chad [Электронный ресурс] // Britannica. – URL: <https://www.britannica.com/place/Chad> (дата обращения: 15.04.2026).
18. Chudnovsky A., Kostinski A., Herrmann L., Koren I., Nutesku G., Bendor E. Hyperspectral spaceborne imaging of dust-laden flows: Anatomy of Saharan dust storm from the Bodélé Depression // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol. 115, No. 4. – P. 1013–1024. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711000153> (дата обращения: 20.05.2026).
19. Darvishi Bolorani A., Soleimani M., Papi R., Nasiri N., Amiri F., Neysani Samany N., Al-Hemoud A. Global map of characterized dust sources using multisource remote sensing data // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 1. – DOI: 10.1038/s41598-025-14794-3.
20. Duce R. A. Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate // Dahlem Workshop Reports. – 1995. – P. 43–72.
21. Encyclopedia of Earth. Global dust budget [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://editors.eol.org> (дата обращения: 09.04.2026).
22. ERA5: ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present [Electronic resource] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels> (дата обращения: 02.05.2026).
23. GES DISC: NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Electronic resource] // NASA EarthData. – URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 01.05.2026).
24. Giovanni: The Bridge between Data and Science [Electronic resource] // NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). – URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (дата обращения: 01.05.2026).
25. Heft-Neal S., Burney J., Bendavid E., Burke M., et al. Dust pollution and infant mortality in the Sahel: a quasi-experimental study // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 726. – 138539. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138539.

– URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720325705>
(дата обращения: 20.04.2026).

26. McSweeney C., New M., Lizcano G. UNDP Climate Change Country Profiles: Chad [Электронный ресурс] / United Nations Development Programme. – New York, 2006. – 27 p. – URL: http://country-profiles.geog.ox.ac.uk/UNDP_reports/Chad/Chad.hires.report.pdf (дата обращения: 15.04.2026).

27. MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 [Electronic resource] // NASA GES DISC. – URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2> (дата обращения: 20.05.2026).

28. RP5.RU: Расписание Погоды [Электронный ресурс] // ООО «Расписание Погоды». – Чад, Фая-Ларджо, 2011–2026. – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 20.05.2026).

29. Scheaua F. D. Fluid flow inside a VENTURI tube: 3D modelling and CFD analysis [Электронный ресурс] // Dunărea de Jos University of Galați. – Режим доступа: по электронной почте panel.scheaua@ugal.ro (дата обращения: 29.03.2026).

30. Tibesti Mountains [Электронный ресурс] // Peakware : энциклопедия гор. – 2016. – URL: <https://web.archive.org/web/20160303185507/http://www.peakware.com/areas.html?a=385> (дата обращения: 05.04.2026).

31. Todd M. C., Washington R. Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad: The role of the low-level jet // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32, No. 17. – L17701. – DOI: 10.1029/2005GL023597.

32. Washington R., Todd M. C., Engelstaedter S., Mbainayel S., Mitchell F. Dust and the low-level circulation over the Bodélé Depression, Chad: Observations from BoDEX 2005 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2006. – Vol. 111, No. D3. – DOI: 10.1029/2005JD006502.

33. World Health Organization. Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment: Air pollution and health [Электронный ресурс] // WHO. – 2024. – URL: <https://www.who.int/tools/compendium-on-health-and-environment/air-pollution-and-health> (дата обращения: 27.03.2026).

34. World Health Organization. Understanding the health impacts of sand and dust storms [Электронный ресурс]: Science and policy snapshots on air quality, energy and health. – 2025. – URL: <https://www.who.int/publications/i/item/B09453> (дата обращения: 27.03.2026).

35. Сакерин С. М., Кабанов Д. М. О взаимосвязях параметров формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 1–4 мкм // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 3. – С. 222–228.

36. Ben-Ami Y., Koren I., Rudich Y., Artaxo P., Martin S. T., Andreae M. O. Transport of Saharan dust from the Bodélé Depression to the Amazon Basin: a case study // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2010. – Vol. 10. – P. 7533–7544. – DOI: 10.5194/acp-10-7533-2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 4. – Результат полученных данных с веб-карт GIOVANNI для составления сводной таблицы по всем рассматриваемым случаям по значениям индекса UV

Карта распределения индекса UV	Дата	Значение
Time Averaged Map of UV Aerosol Index daily 1 deg. [OMI OMAERUVd v003] over 2025-01-22, Region 13E, 7N, 25E, 24N	22.01.2025	10-15
Time Averaged Map of UV Aerosol Index daily 1 deg. [OMI OMAERUVd v003] over 2023-10-01, Region 13E, 7N, 25E, 24N	10.01.2023	10-15
Time Averaged Map of UV Aerosol Index daily 1 deg. [OMI OMAERUVd v003] over 2024-04-18, Region 13E, 7N, 25E, 24N	18.04.2024	15-20

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчётная таблица, статистика

Цель: предоставить полный числовой материал для анализа и верификации выводов

Excel-файл, содержащий для каждого из 31 случая: год, месяц, исходные AOT_max и AOT_traj, скорректированные AOD, реанализный AOD, абсолютные и относительные отклонения, а также статистические показатели для 2025 года (средние значения, стандартное отклонение отклонений). Представляет собой основной числовой материал для анализа.

Таблица 5. Статистика, расчёт критериев

	Корреляция Пирсона	Среднее спутник	Среднее AOT (max)	Bias	RMSE	Std Error	Отн. смещение (%)	Среднее (traj) траектория
AOT_max	0,368033428	0,571495696	0,662825869	0,091330173	0,311966832	0,303229573	15,98090294	
AOT_traj(траектория)	0,337874681	0,571495696		0,079508162	0,244448675	0,234978141	13,91229417	0,651003859

Таблица 6 – Сводная таблица сравнения визуально снятых с веб-карт AOT и реанализный AOD, где реанализный AOD - истинное значение, полученное из ncd файлов, diff_max – систематическое смещение для максимумов, diff_traj - смещение для траекторных значений, rel_diff_max – относительная ошибка для максимумов, rel_diff_traj- относительная ошибка для траекторных значений

случай	год	месяц	AOT_max	AOT_траектория	AOD_истинное значение	AOD_траектория	спутник_aod	diff_max	diff_traj	rel_diff_max	rel_diff_traj
1	2025	январь	98,43	70,3	0,544	0,539	0,387	0,157	0,152	40,498	39,364
2	2025	январь	77,92	61,63	0,430	0,473	0,387	0,043	0,086	11,222	22,176
3	2023	февраль	117,6	80,1	0,649	0,614	0,517	0,132	0,097	25,570	18,785
4	2023	декабрь	92,44	65,1	0,511	0,499	0,354	0,157	0,145	44,247	41,085
5	2025	март	102,2	70,3	0,564	0,539	0,459	0,105	0,080	22,843	17,357
6	2025	апрель	131,6	105,4	0,727	0,808	0,475	0,252	0,333	53,003	70,192
7	2025	апрель	182,7	125,3	1,009	0,961	0,475	0,534	0,486	112,414	102,325
8	2025	апрель	143,33	110,1	0,792	0,845	0,475	0,317	0,370	66,641	77,829
9	2025	май	156,4	95,1	0,864	0,729	0,701	0,163	0,029	23,267	4,099
10	2025	май	156,4	130,9	0,864	1,004	0,701	0,163	0,303	23,267	43,286
11	2024	апрель	98,16	80,6	0,542	0,618	0,585	-0,042	0,034	-7,262	5,758
12	2024	апрель	110,57	100,4	0,611	0,770	0,585	0,026	0,186	4,463	31,790
13	2023	март	153,3	120,1	0,847	0,921	0,498	0,349	0,424	70,151	85,135
14	2023	апрель	301,1	136,6	1,663	1,048	0,736	0,927	0,312	126,065	42,438
15	2024	ноябрь	70,76	50,1	0,391	0,384	0,415	-0,025	-0,031	-5,915	-7,482
16	2023	октябрь	170,7	151,8	0,943	1,164	0,689	0,254	0,475	36,830	68,994
17	2023	октябрь	299,9	134,6	1,656	1,032	0,689	0,967	0,343	140,394	49,846
18	2023	ноябрь	90,11	70,61	0,498	0,542	0,404	0,094	0,138	23,295	34,182
19	2023	июнь	127,6	99,74	0,705	0,765	0,703	0,002	0,062	0,276	8,861
20	2023	июнь	118,4	93,2	0,654	0,715	0,703	-0,049	0,012	-6,953	1,723
21	2023	июнь	93,17	43,71	0,515	0,335	0,703	-0,188	-0,367	-26,781	-52,293
22	2023	июль	73,05	49,73	0,403	0,381	0,670	-0,266	-0,288	-39,748	-43,033
23	2023	июль	83,19	74,81	0,459	0,574	0,670	-0,210	-0,096	-31,385	-14,304
24	2023	август	60,58	36,2	0,335	0,278	0,662	-0,327	-0,384	-49,433	-58,033
25	2024	июнь	141,4	115,5	0,781	0,886	0,765	0,016	0,121	2,108	15,837
26	2025	июнь	110,4	86,49	0,610	0,663	0,548	0,061	0,115	11,200	20,992
27	2025	июнь	92,62	43,89	0,512	0,337	0,548	-0,037	-0,212	-6,709	-38,602
28	2025	август	51,67	51,67	0,285	0,396	0,615	-0,330	-0,219	-53,635	-35,607
29	2025	август	74,2	57,8	0,410	0,443	0,615	-0,206	-0,172	-33,419	-27,967
30	2025	август	84,61	75,57	0,467	0,580	0,615	-0,148	-0,036	-24,077	-5,822
31	2025	сентябрь	56,06	43,7	0,310	0,335	0,369	-0,060	-0,034	-16,201	-9,276

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Цель: выявление тесноты связей между исходными AOT, скорректированными AOD и данными реанализа, чтобы обосновать выбор коэффициента коррекции, строится тепловая карта.

Корреляция между AOT_max и AOT_traj составляет 0,83, что указывает на взаимозаменяемость типов измерений.

Установлена полная идентичность пар переменных AOD_max_corr с AOT_max и AOD_traj_corr с AOT_traj ($r = 1,00$; $p = 0,00$), что свидетельствует о дублировании данных.

Между показателями AOD_max_corr и AOD_traj_corr (включая соответствующие AOT) выявлена значимая положительная корреляция ($r(a=0,05) = 0,83$; $p = 0,00$ (корр название и что характеризует)), указывающая на высокую согласованность двух методов оценки ($p > a$)

Корреляции sat_aod с остальными переменными: $r = 0.34–0.37$. С AOD_max_corr / AOT_max: $p = 0.0416$ (значимо на уровне 0.05). С AOD_traj_corr / AOT_traj: $p = 0.063$ (не значимо на уровне 0.05, но близко к порогу). Это говорит о том, что спутниковые данные (sat_aod) умеренно согласуются с наземными/модельными оценками, но связь с траекторными методами чуть слабее и не всегда значима.

Таким образом, наибольшее взаимное соответствие демонстрируют наземные или расчётные данные внутри каждой группы, тогда как спутниковый продукт показывает более слабую и не всегда значимую связь с траекторными оценками.

$$r_{кр} = 0.3550 (n = 31, \alpha = 0.05) \quad (3.1)$$

	AOD_max_corr	AOD_traj_corr	sat_aod(merra-2)	AOT_max	AOT_traj
AOD_max_corr	1.0000	0.8256	0.3680	1.0000	0.8256
AOD_traj_corr	0.8256	1.0000	0.3379	0.8256	1.0000
sat_aod(merra-2)	0.3680	0.3379	1.0000	0.3680	0.3379
AOT_max	1.0000	0.8256	0.3680	1.0000	0.8256
AOT_traj	0.8256	1.0000	0.3379	0.8256	1.0000
матрица условной значимости					
	AOD_max_corr	AOD_traj_corr	sat_aod(merra-2)	AOT_max	AOT_traj
AOD_max_corr	0.0	0.0	0.041646	0.0	0.0
AOD_traj_corr	0.0	0.0	0.063028	0.0	0.0
sat_aod(merra-2)	0.041646	0.063028	0.0	0.041646	0.063028
AOT_max	0.0	0.0	0.041646	0.0	0.0
AOT_traj	0.0	0.0	0.063028	0.0	0.0

Рисунок 29 – Таблицы с представлением матрицы корреляции и её согласованностью (первая таблица – а уровень значимости, вторая таблица р расчётная вероятность)

При допущении вероятности ошибки 5%(а) расчётная вероятность (р) должна быть меньше или равна уровню значимости, чтобы результат был статистически значим,

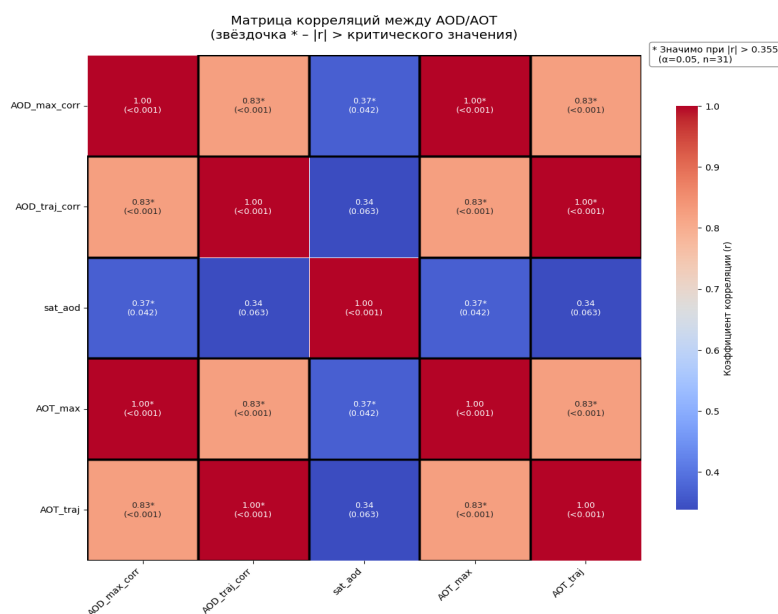


Рисунок 30 – Тепловая матрица корреляций между измеренными и скорректированными переменными.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Цель: проследить, как ошибка меняется от случая к случаю, и идентифицировать выбросы, требующие особого анализа, построена гистограмма.

Гистограмма, построенная для разностей $AOD_{corr} - sat_AOD$ отдельно для максимальных и траекторных значений. Показывает, насколько часто встречаются положительные или отрицательные отклонения, а также их величину.

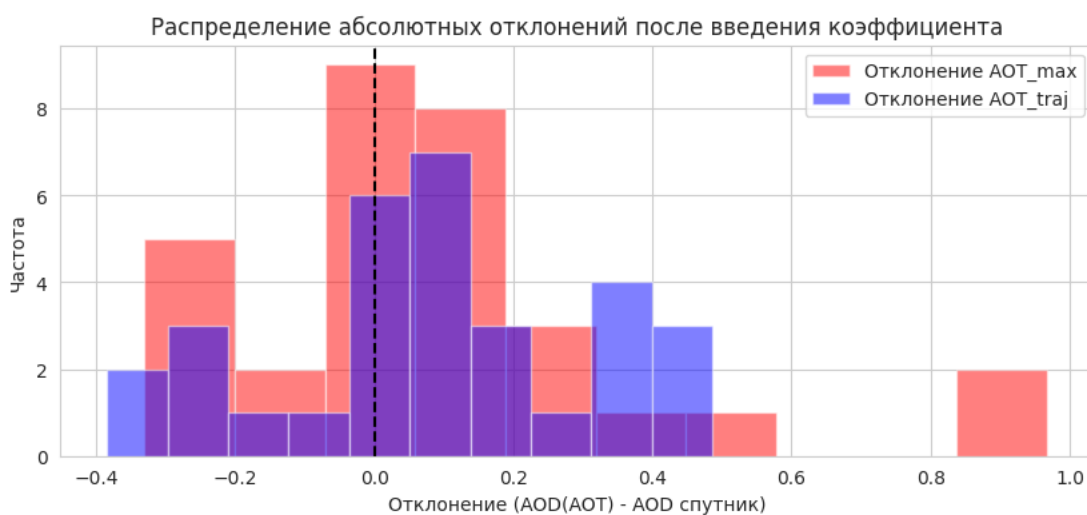


Рисунок 31 – Распределение абсолютных отклонений между снятыми вручную измерениями AOT max и реконструированным полем AOD

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Сравнение с 2025 годом.

Цель: определить сезонную динамику визульно-снятых и ретроперспективных данных в конкретном году и выявить месяцы с максимальными расхождениями.

Столбчатая диаграмма для каждого месяца 2025 года показывает средние значения скорректированных визуальных оценок AOT (по максимальному выносу и траекторному) и среднемесячный AOD по данным реанализа.

Наглядно демонстрируется сезонная динамика и расхождения в различные месяцы.

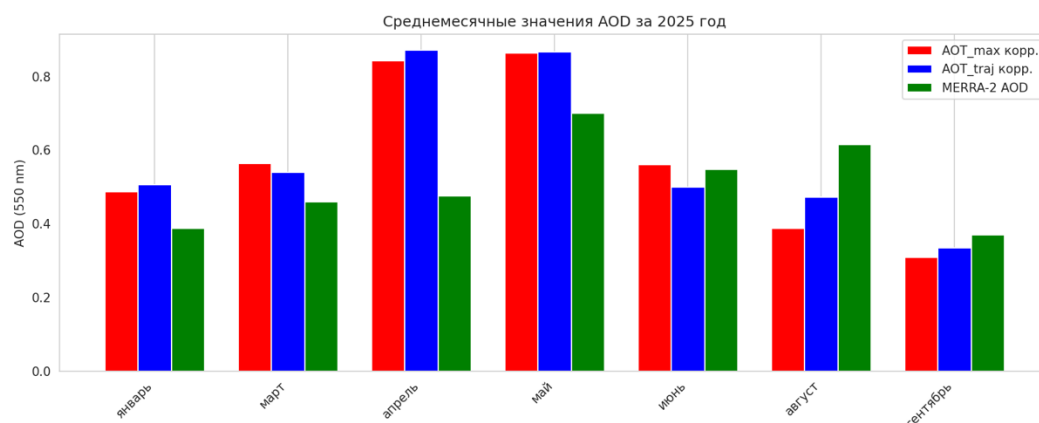


Рисунок 32 – Среднемесячные значения AOD за 2025 год: сравнение вручную собранных и модельных данных, где AOT_max корр. AOT_traj корр. MERRA-2 AOD

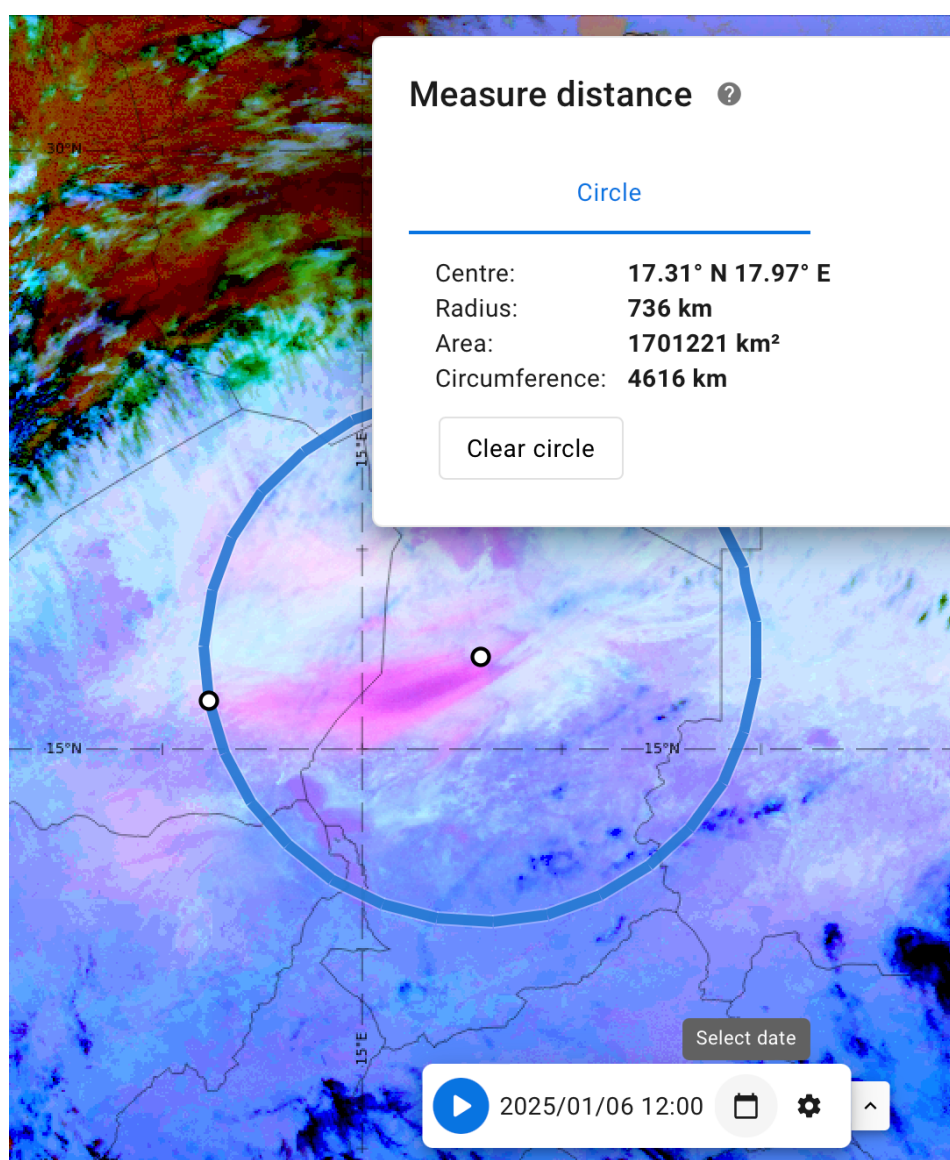


Рисунок 33 – Пример рассмотрения пылевого шлейфа с канала DUST RGB (MSG) за 6 января 2025 года 12 ВСВ, где значение Radius – длина распространения хвоста шлейфа.