



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
(Магистерская диссертация)

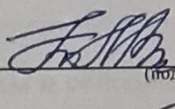
На тему: «Анализ условий формирования пыльных бурь на Аравийском
полуострове с использованием спутниковых снимков»

Исполнитель Абдулкадер Ахмед Мохаммед Абдулрахман
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(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)

« 1 » июня 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

Содержание

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ПЫЛЬНЫЕ БУРИ КАК АТМОСФЕРНОЕ ЯВЛЕНИЕ: ПРИРОДА И ОСОБЕННОСТИ	10
1.1 Определение, классификация и физические характеристики пыльных бурь	10
1.2 Географические и климатические особенности Аравийского полуострова.....	13
1.3 Источники и очаги пылеобразования на Аравийском полуострове.....	17
1.4 Обзор исследований пыльных бурь на Аравийском полуострове.....	20
2. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ПЫЛЬНЫХ БУРЬ	23
2.1 Возможности спутниковых методов наблюдения атмосферных явлений	23
2.2 Спутниковые системы и сенсоры, применяемые для анализа пыльных бурь	25
2.3 Спектральные индексы и алгоритмы выделения пылевых аэрозолей ..	27
2.4 Верификация спутниковых данных по наземным наблюдениям	31
2.5 Методология использования данных реанализа и синоптического анализа.....	34
3. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПЫЛЬНЫХ БУРЬ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СНИМКИ	37
3.1 Пыльные бури в Вади-эль-Давасир 29.04.2024.....	37

3.1.1 Анализ синоптической ситуации.....	37
3.1.2 Анализ данных реанализа Merra 2.....	40
3.1.3 Анализ пылевых шлейфа.....	41
3.2 Пыльные бури в Кувейте 04.05.2025.....	54
3.2.1 Анализ синоптической ситуации.....	55
3.2.2 Анализ данных реанализа Merra 2.....	58
3.2.3 Анализ пылевых шлейфа.....	59
3.3 Анализ ветрового режима при пыльных явлениях на Аравийском полуострове.....	72
3.3.1 Преобладающие направления ветра и их повторяемость.....	72
3.3.2 Распределение скоростей ветра по направлениям.....	73
3.3.3 Ветровой режим и перенос пыли.....	74
3.4 Анализ повторяемости синоптических ситуаций при пыльных явлениях на Аравийском полуострове	75
3.4.1 Общая характеристика синоптических ситуаций.....	75
3.4.2 Роль барической ложбины в формировании пыльных явлений	77
3.4.3 Вклад гребня и барической седловины.....	78
3.4.4 Синоптические условия и региональные особенности.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	84
ПРИЛОЖЕНИЕ А	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	91
ПРИЛОЖЕНИЕ В	93
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	97

ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Ё.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	103
ПРИЛОЖЕНИЕ З.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ К	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Л	111

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

С.Ш.	Северная Широта
В.Д	Восточная Долгота
DCM	Масса столба пыли
DS	Пыльная буря
RGB	Многоспектральный цветовой композит
Cb	Кучево-дождевые
AOD	Аэрозольная оптическая толщина
AE	Показатель Энгстрема
AI	Аэрозольный индекс
OMI	Инструмент мониторинга озона
UVAI	Ультрафиолетовый аэрозольный индекс
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
SYNOP	Surface Synoptic Observation
AERONET	Aerosol Robotic Network
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
н.у.м.	над уровнем моря

ВВЕДЕНИЕ

Пыльные бури относятся к числу наиболее мощных и социально значимых атмосферных явлений аридных и семиаридных регионов мира. Аравийский полуостров, занимающий площадь около 3,2 млн км² и расположенный в зоне тропических пустынь и полупустынь, является одним из глобальных «горячих точек» пылевой активности. По оценкам Всемирной метеорологической организации, регион генерирует от 25 до 40% мирового объёма пустынной пыли, ежегодно поступающей в атмосферу. Вынос мелкодисперсных частиц в атмосферу оказывает многостороннее воздействие на региональный климат, качество воздуха, здоровье населения, авиационную и наземную транспортную инфраструктуру, а также на морские экосистемы Арабского залива, Аравийского моря, Аденского залива и Красного моря [1].

Актуальность темы исследования определяется рядом взаимосвязанных факторов. Во-первых, повышение частоты экстремальных пыльных бурь на Аравийском полуострове, зафиксированное в последние десятилетия, ставит перед учёными задачу выявления причин и механизмов этого явления. Во-вторых, быстрое социально-экономическое развитие стран региона — Саудовской Аравии, ОАЭ, Кувейта, Катара, Бахрейна, Омана и Йемена — обусловило высокую уязвимость урбанизированных территорий и критической инфраструктуры к воздействию пыльных бурь. В-третьих, несмотря на значительный научный интерес к данной проблеме, условия формирования пыльных бурь именно на Аравийском полуострове остаются изученными недостаточно полно, а применение современных методов дистанционного зондирования открывает новые возможности для их комплексного анализа.

Спутниковые методы наблюдения стали незаменимым инструментом в изучении пыльных бурь. В отличие от наземных метеорологических станций, которые на Аравийском полуострове распределены крайне неравномерно,

спутниковые снимки обеспечивают сплошное пространственное покрытие территории с высоким временным разрешением. Современные сенсоры — MODIS (на спутниках Terra и Aqua), VIIRS (Suomi NPP и NOAA-20), SEVIRI (Meteosat), а также инструменты гиперспектрального зондирования — позволяют идентифицировать пылевые шлейфы, оценивать оптическую глубину аэрозоля (AOD), определять источники и направления переноса пыли. Интеграция спутниковых данных с реанализами атмосферной циркуляции (MERRA-2) открывает возможности для установления синоптических условий возникновения пыльных бурь[2].

Целью настоящей работы является комплексный анализ условий формирования пыльных бурь на Аравийском полуострове на основе спутниковых данных дистанционного зондирования в сочетании с метеорологической информацией.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) изучить физические механизмы формирования пыльных бурь и обобщить данные о климатических особенностях Аравийского полуострова как региона повышенной пылевой активности;

2) обосновать выбор спутниковых инструментов и методов обработки данных, применяемых в настоящем исследовании;

3) провести детальный анализ синоптических, динамических и аэрозольных условий двух интенсивных пыльных событий на Аравийском полуострове (29 апреля 2024 г. и 4 мая 2025 г.) на основе комплекса спутниковых продуктов;

4) выявить закономерности ветрового режима при пыльных явлениях на основе анализа 30 задокументированных случаев по данным многостанционной наблюдательной сети полуострова;

5) классифицировать синоптические ситуации, при которых на Аравийском полуострове фиксируются пыльные явления, и установить вклад каждого синоптического типа в их формирование.

Объектом исследования служат пыльные бури и пыльные явления, формирующиеся на территории Аравийского полуострова. Предметом исследования являются синоптические, динамические и физические условия их возникновения, развития и переноса, устанавливаемые методами спутникового дистанционного зондирования в комплексе с данными реанализа и наземных наблюдений.

Временные рамки исследования охватывают период с июля 2024 по январь 2026 года; детально проанализированы два пыльных события: 29 апреля 2024 г. (Вади-эль-Давасир, Центральная Аравия) и 4 мая 2025 г. (Кувейт). Территориальные рамки — Аравийский полуостров и прилегающие районы (Месопотамия, акватории Персидского залива и Аравийского моря).

Методологическую основу работы составляет совместное применение методов дистанционного зондирования Земли из космоса и синоптического анализа атмосферных процессов. В качестве основных источников данных использованы: спутниковые продукты NASA (VIIRS/NOAA-21), геостационарные снимки Meteosat/SEVIRI в схеме Dust RGB, аэрозольные продукты OMI/Aura (AI, UVAI) и AIRS (Dust Score), данные сети AERONET, реанализ MERRA-2 (NASA GMAO), а также оперативные наблюдения METAR..

Научная новизна исследования состоит в следующем. Впервые для двух конкретных пыльных событий на Аравийском полуострове проведён одновременный анализ шести независимых спутниковых продуктов (VIIRS True Color, Meteosat Dust RGB, AERONET AOD, Ångström Exponent, OMI AI/UVAI, AIRS Dust Score), что обеспечивает взаимную верификацию результатов. На основе статистики 30 пыльных случаев впервые для данного региона и данного периода наблюдений количественно обоснована

доминирующая роль барической ложбины как ведущего синоптического условия возникновения пыльных явлений.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов в системах оперативного мониторинга и краткосрочного прогнозирования пыльных бурь в регионе, в том числе в интересах авиационной безопасности, охраны здоровья населения и рационального природопользования в странах Аравийского полуострова.

1. ПЫЛЬНЫЕ БУРИ КАК АТМОСФЕРНОЕ ЯВЛЕНИЕ: ПРИРОДА И ОСОБЕННОСТИ

1.1 Определение, классификация и физические характеристики пыльных бурь

Пыльные бури (Рис 1.1) представляют собой одно из наиболее масштабных и разрушительных атмосферных явлений в пустынных и засушливых регионах земного шара. Согласно определению Всемирной метеорологической организации (ВМО), пыльная буря — это метеорологическое явление, при котором сильный ветер поднимает и переносит значительные количества пыли и песка с земной поверхности, вызывая снижение горизонтальной видимости до величин менее 1000 метров [3]. В отдельных случаях, при особо интенсивных событиях, видимость может снижаться практически до нуля, что создаёт серьёзную угрозу для авиационного и наземного транспорта, а также для здоровья населения.

В научной и метеорологической литературе для описания явлений, связанных с переносом пыли, используется ряд смежных терминов. Понятие «пыльная мгла» (haze) обозначает состояние атмосферы, при котором мелкодисперсные частицы пыли равномерно распределены в воздухе и снижают видимость, однако без выраженного ветрового переноса непосредственно в момент наблюдения. «Поземок» (blowing dust) — перенос пыли на малой высоте, когда видимость снижается лишь в приземном слое, тогда как на высоте 2 м и более атмосфера остаётся относительно прозрачной. Наконец, «пыльный шквал» (dust devil) — вихревое конвективное явление небольшого масштаба, формирующееся при перегреве поверхности и характеризующееся кратковременностью и ограниченным пространственным охватом [4]. Разграничение этих понятий принципиально важно как для

метеорологических наблюдений, так и для корректной интерпретации спутниковых данных.

Классификация пыльных бурь может осуществляться по нескольким основаниям. По интенсивности и степени снижения видимости принято выделять слабые (видимость от 500 до 1000 м), умеренные (от 200 до 500 м) и сильные (менее 200 м) пыльные бури [5]. По своему генезису пыльные бури подразделяются на фронтальные, термические и конвективные. Фронтальные бури возникают при прохождении атмосферных фронтов, сопровождающихся резким усилением ветра; термические — в условиях интенсивного прогрева поверхности, приводящего к развитию конвективного пограничного слоя значительной мощности; конвективные бури типа формируются у передней границы мощных грозовых конвективных систем в результате нисходящих потоков воздуха, распространяющихся горизонтально у земли. По пространственному охвату выделяют локальные (сотни километров), региональные (тысячи километров) и трансконтинентальные (десятки тысяч километров) пыльные бури.

Физические механизмы подъёма пыли с поверхности детально исследованы в работах Бэгнолда [6], Гинукса [7] и ряда других авторов. Согласно современным представлениям, пылеподъём осуществляется посредством трёх взаимосвязанных процессов. Первый — сальтация (saltation): крупные частицы диаметром 70–500 мкм под действием ветра движутся скачкообразно, ударяются о поверхность и при каждом ударе выбивают множество более мелких частиц, которые поступают во взвесь. Второй процесс — суспензия (suspension): частицы диаметром менее 20 мкм удерживаются в атмосфере турбулентными воздушными потоками и могут переноситься на тысячи километров. Третий — перекатывание (creep): наиболее крупные частицы (более 500 мкм) перемещаются непосредственно по поверхности, не отрываясь от неё. Именно сальтация является главным

механизмом, запускающим массовый пылеподъём, поскольку энергия ударов сальтирующих частиц многократно эффективнее прямого воздействия ветра на лежащие частицы [6].

Пороговая скорость ветра, необходимая для инициирования пылеподъёма, зависит от гранулометрического состава, влажности, уплотнённости и характера поверхности почвы. Для типичных пустынных грунтов Аравийского полуострова пороговая скорость у поверхности составляет 6–9 м/с, однако на лишённых растительности солончаках (себхах) этот порог может снижаться до 4–5 м/с вследствие особой рыхлости верхнего слоя [7]. Гранулометрический состав переносимого материала охватывает широкий диапазон: от частиц менее 1 мкм (тонкая минеральная пыль) до 100–150 мкм (крупный алеврит). Для оценки воздействия на здоровье населения особое значение имеют фракции PM10 (частицы диаметром менее 10 мкм) и PM2.5 (менее 2,5 мкм), способные проникать в нижние отделы дыхательных путей и альвеолы лёгких [8].

С точки зрения оптических свойств пылевые аэрозоли характеризуются показателем оптической глубины аэрозоля (Aerosol Optical Depth, AOD), отражающим степень ослабления солнечного излучения при прохождении через атмосферный столб. В условиях интенсивной пыльной бури AOD на длине волны 550 нм может превышать 3–5 единиц, тогда как для чистой атмосферы типичные значения составляют 0,05–0,15 [9]. Этот параметр является ключевым при использовании спутниковых данных для обнаружения и количественной оценки пыльных бурь.



рис 1.1 - Пыльная буря

[<https://images.akhbarelyom.com/images/images/large/20250429225449900.jpg>]

1.2 Географические и климатические особенности Аравийского полуострова

Аравийский полуостров (рис 1.2) является крупнейшим полуостровом Земли: его площадь составляет около 3,2 млн км², а с прилегающими районами Месопотамской низменности — свыше 3,7 млн км². Территориально он охватывает Саудовскую Аравию (наибольшую по площади страну региона), Йемен, Оман, Объединённые Арабские Эмираты, Катар, Бахрейн и Кувейт. С запада полуостров омывается водами Красного моря, с востока — Персидского залива и Оманского залива, с юга — Аравийского моря. Такое географическое положение, в сочетании с преобладанием низкогогорного и равнинного рельефа, определяет господство воздушных масс тропического пустынного происхождения на протяжении большей части года [10].



рис 1.2 - Аравийский полуостров

[https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/271828/pub_681a8e2c1d84a936882dc291_681a8e7826518879778163c4/scale_1200]

В геоморфологическом отношении Аравийский полуостров характеризуется разнообразным рельефом. Вдоль западного побережья горы Хиджаз, Асир и Ан-Наби Шуайб (рис 1.3), достигающие высоты до 3600 метров над уровнем моря, служат барьером против влажного воздуха, поступающего с Красного моря. Центральную и юго-восточную части

занимает обширное плато Хадрамаут, постепенно спускающееся к Аравийскому морю. Южная часть полуострова занята крупнейшим в мире массивом мягкого песка — пустыней Руб-эль-Хали, занимающей площадь более 650 000 квадратных километров. К северу расположены две другие песчаные пустыни: Ан-Нафуд эль-Кубра и Ад-Дахна, которые соединены с Руб-эль-Хали.



рис 1.3 - Гора Ан-Наби Шуайба

[[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Kawkaban_-
68_%28353668857%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Kawkaban_-_68_%28353668857%29.jpg)]

Климат Аравийского полуострова относится к типу тропического пустынного (классификация Кёппена — BWh) с чертами экстремальной континентальности во внутренних районах. Главными климатообразующими

факторами служат: субтропический пояс высокого давления, определяющий устойчивое нисходящее движение воздуха и подавляющий конвективные осадки; крайняя сухость воздушных масс, поступающих с материка; интенсивная инсоляция при почти безоблачном небе; специфика водных бассейнов (мелководный хорошо прогреваемый Персидский залив и более глубокое Красное море).

Среднегодовое количество осадков на большей части Аравийского полуострова не превышает 100 мм, а во внутренних районах Руб-эль-Хали — менее 30 мм. Испаряемость при этом в 20–40 раз превышает количество выпадающих осадков, что обуславливает абсолютное господство дефицита влаги. Температурный режим отличается резкими суточными и сезонными колебаниями. Среднемесячные температуры воздуха в июле достигают +35...+40°C в большинстве районов, а максимальные значения у поверхности почвы превышают +70°C. Зимой в возвышенных районах возможны ночные заморозки. Относительная влажность воздуха в пустынных районах в летний период составляет 10–25%, что создаёт исключительно благоприятные условия для пылеподъёма [11].

Ветровой режим Аравийского полуострова определяется муссонной циркуляцией и сезонными барическими системами. Наибольшее значение для переноса пыли имеют следующие ветровые системы. Шамаль — устойчивый северо-западный или северный ветер, господствующий над Персидским заливом и северной Аравией в летние месяцы. Скорость шамалья нередко достигает 15–20 м/с и выше, что обеспечивает массовый вынос пыли из пустынь Месопотамии и северной Аравии. Зимний шамаль носит более эпизодический характер и связан с прохождением средиземноморских циклонов. Кяус — юго-восточный ветер, дующий в осенне-зимний период и способный поднимать пыль в южных и восточных районах полуострова. Хабуб — конвективные пыльные стены, характерные для Йемена, Омана и юга Саудовской Аравии в период летнего муссона; они возникают на фронте

холодных нисходящих потоков грозových систем и отличаются кратковременностью при чрезвычайно высокой интенсивности [12].

Важным климатическим фактором, усугубляющим пылевую активность, является межгодовая изменчивость климата региона, связанная с явлениями Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) и Индийским океанским диполем (IOD). В годы с положительной фазой ЭНЮК осадки над Аравийским полуостровом снижаются, почвы иссыхают сильнее обычного, а интенсивность пылевых бурь возрастает. В последние десятилетия ряд исследований зафиксировал тенденцию к учащению экстремальных пылевых событий, что связывается как с региональными климатическими изменениями, так и с усилением деградации земель [13].

1.3 Источники и очаги пылеобразования на Аравийском полуострове

Пространственное распределение источников пыли на Аравийском полуострове и в прилегающих районах детально исследовано в работах Гинукса и соавторов [7], Приспере [14], а также в рамках крупных международных проектов (AEROCOM, DUST-CLIM). Для идентификации источников активно применяются спутниковые данные (прежде всего продукты MODIS Deep Blue AOD), модели обратных траекторий и региональные модели переноса аэрозолей. На основании этих исследований в регионе выделяется несколько ключевых очагов пылеобразования.

Пустыня Руб-эль-Хали (рис 1.4) является крупнейшим внутриполуостровным источником пыли. Её поверхность сложена незакреплёнными мелкозернистыми песками, практически лишёнными растительного покрова; скорость дефляции здесь достигает максимальных значений во время сильных шамалей. Пылевые шлейфы из Руб-эль-Хали прослеживаются на спутниковых снимках на расстоянии до 2000 км и могут достигать Индийского субконтинента и Восточной Африки [15].



рис 1.4 - Пустыня Руб-эль-Хали

[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%83%D0%B1-%D1%8D%D0%BB%D1%8C-%D0%A5%D0%B0%D0%BB%D0%B8#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Rub_al_Khali_002.JPG]

Месопотамская низменность (долины Тигра и Евфрата на территории Ирака и Сирии) является важнейшим трансграничным источником пыли, поступающей на Аравийский полуостров с потоками шамала. Деградация почвенного покрова в результате многовекового орошаемого земледелия, а также опустынивание, резко усилившееся в последние десятилетия вследствие водохозяйственных изменений (строительство плотин на Тигре и Евфрате, снижение уровня Большого Горького озера в Ираке), привели к значительному расширению дефляционных площадей [16].

Особую роль среди источников пыли играют прибрежные и внутренние солончаки — себхи (рис 1.5) (sabkhas). Эти плоские, практически лишённые

растительности депрессии с засоленными грунтами широко распространены в прибрежных районах Персидского залива, в Руб-эль-Хали и на юге Ирака. Себхи генерируют исключительно мелкодисперсный пылевой материал: вследствие кристаллизации солей поверхностный слой приобретает рыхлую хлопьевидную структуру, которая разрушается даже при относительно слабом ветре. По данным спутниковых исследований, себхи Арабского залива и ОАЭ обеспечивают значительную долю региональной пылевой эмиссии, особенно в зимне-весенний период [17].



рис 1.5 - себхи

[https://alwatan.om/uploads/important_images/uploads/2023/05/P_16_A-5.jpg]

Важную роль в современной динамике пылеобразования играют антропогенные факторы. Сельскохозяйственная деятельность в оазисах — распашка целинных земель, несоблюдение агротехнических норм, чрезмерный выпас скота — разрушает защитную плёнку пустынного загара и делает почвы уязвимыми для дефляции. Интенсивное нефтепромысловое и дорожное строительство обнажает обширные площади свежего грунта.

Наконец, многолетние вооружённые конфликты в Ираке и Йемене привели к деградации традиционных систем землеустройства и, по ряду оценок, к заметному росту пылеэмиссии в зонах боевых действий [18].

Квантификация вклада различных источников пыли остаётся предметом активных дискуссий. По оценкам, основанным на продуктах MODIS и моделировании с помощью модели NYSPLIT, на долю Месопотамии и севера Аравийского полуострова приходится около 40–50% суммарной пылевой эмиссии в регионе Ближнего Востока, тогда как вклад Руб-эль-Хали и себх Персидского залива составляет ещё около 30–35% [19]. Оставшаяся доля приходится на трансграничный перенос из пустынь Северной Африки (Сахара) и Центральной Азии.

1.4 Обзор исследований пыльных бурь на Аравийском полуострове

История систематического изучения пыльных бурь на Аравийском полуострове восходит к первым десятилетиям XX века, когда британские метеорологи начали вести регулярные наблюдения в рамках колониальной метеорологической службы. Первые научные сводки о пыльных бурях в регионе Персидского залива были опубликованы в 1940–1950-х годах и основывались исключительно на данных редкой сети наземных станций [20]. Ограниченность наблюдательной инфраструктуры не позволяла получить сколько-нибудь полной пространственной картины явления.

Качественный скачок в исследованиях произошёл с началом эры спутникового зондирования. Первые работы, использующие данные спутника Landsat (с 1972 г.) и сенсора AVHRR (с 1979 г.), позволили картировать крупные пылевые шлейфы над Аравийским полуостровом и Индийским океаном. Пионерные исследования Проспера и соавторов [21] заложили основы глобальной спутниковой климатологии пыли, отведя Аравийскому

полуострову и прилегающим пустыням статус одного из главных мировых источников минерального аэрозоля.

С запуском спутников Terra (1999) и Aqua (2002), несущих сенсор MODIS, началась современная эпоха в спутниковых исследованиях аравийской пыли. Высокое пространственное (250–500 м) и умеренное временное (один–два раза в сутки) разрешение MODIS в сочетании с широким набором спектральных каналов сделали этот инструмент основным источником информации о пыльных бурях. Ключевые достижения этого периода включают: разработку алгоритмов Deep Blue и Dark Target для восстановления AOD над яркими пустынными поверхностями создание многолетних (более 20 лет) временных рядов пылевой активности; установление связи между интенсивностью пыльных бурь и крупномасштабными атмосферными процессами [22].

Значительный вклад в изучение пыльных бурь в регионе внесли работы, посвящённые ветровой системе шамаль. Исследования Эль-Фадли и соавторов [23] показали, что летний шамаль отличается от зимних не только термодинамических условий, но и источниками районами переносимой пыли: летний шамаль питается преимущественно из месопотамских источников, тогда как зимний — из северо-аравийских и сирийских. Ряд работ установил роль струйного течения субтропических широт в формировании интенсивных пыльных эпизодов [24].

Существенный прогресс был достигнут благодаря применению лидарных данных со спутника CALIPSO (запущен в 2006 г.), позволяющих восстанавливать вертикальный профиль пылевого аэрозоля. Это открыло возможность изучать высотную структуру пылевых слоёв над Аравийским полуостровом и оценивать их влияние на радиационный баланс атмосферы. По данным CALIPSO, основная масса аравийской пыли сосредоточена в слое от поверхности до высоты 3–5 км, однако при интенсивных событиях пылевые слои обнаруживаются на высотах до 7–8 км [25].

Параллельно активно развивались численные модели регионального переноса пыли (BSC-DREAM8b, RegCM-dust, WRF-Chem), которые в сочетании со спутниковыми данными позволяют проводить ретроспективный анализ крупных пыльных событий и тестировать гипотезы о механизмах их формирования [26]. Верификация модельных результатов осуществляется с использованием наземных фотометров сети AERONET, ряд станций которой расположен на Аравийском полуострове [27].

Несмотря на значительный прогресс, ряд ключевых вопросов остаётся дискуссионным или недостаточно изученным. К таковым относятся: точная количественная оценка вклада отдельных источников пыли; механизмы взаимодействия пыли с муссонной циркуляцией и облачностью; долгосрочные тренды пылевой активности и их связь с изменением климата; влияние антропогенных факторов (землепользование, водопользование) на динамику пылеэмиссии. Настоящая работа ориентирована на частичное восполнение этих пробелов применительно к условиям Аравийского полуострова на основе современных спутниковых данных.

Проведённый обзор показывает, что пыльные бури на Аравийском полуострове — сложное многофакторное явление, обусловленное уникальным сочетанием природных условий: экстремально аридным климатом, обширными площадями незакреплённых песков и солончаков, интенсивными ветровыми системами. Регион является одним из крупнейших глобальных эмитентов минерального аэрозоля, что определяет широкий международный научный интерес к данной проблематике. Методологическая база исследований пыльных бурь за последние два десятилетия существенно расширилась: спутниковые данные MODIS, CALIPSO, SEVIRI стали ведущим инструментом мониторинга и анализа. Вместе с тем пространственно-временные закономерности пылевой активности и связь конкретных событий с синоптическими условиями изучены недостаточно полно, что обуславливает актуальность задач, решаемых в настоящей работе.

2. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ПЫЛЬНЫХ БУРЬ

2.1 Возможности спутниковых методов наблюдения атмосферных явлений

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса представляет собой совокупность методов получения информации о состоянии земной поверхности, атмосферы и океана путём регистрации электромагнитного излучения, отражённого, рассеянного или испущенного объектами исследования, с помощью бортовых приборов искусственных спутников Земли. Применительно к изучению пыльных бурь дистанционное зондирование обладает рядом принципиальных преимуществ по сравнению с традиционными наземными методами наблюдений [28].

Важнейшим из этих преимуществ является пространственная непрерывность охвата. Наземная сеть метеорологических станций на Аравийском полуострове крайне разрежена: большинство станций сосредоточено в прибрежных городах и оазисах, тогда как обширные пустынные районы — прежде всего Руб-эль-Хали и Нефуд — практически лишены наземных пунктов наблюдений. Спутниковые сенсоры, напротив, обеспечивают сплошное покрытие всей территории полуострова за один–два суток, а геостационарные аппараты — непрерывный мониторинг с временным разрешением 15–30 минут [29]. Это делает их незаменимым инструментом для выявления источников пыли, отслеживания эволюции пылевых шлейфов и оценки масштабов отдельных событий.

Вторым ключевым преимуществом является многоспектральность современных орбитальных сенсоров. Регистрация излучения в нескольких диапазонах электромагнитного спектра — от ультрафиолетового через видимый и ближний инфракрасный до теплового инфракрасного и

микроволнового — позволяет одновременно получать информацию о различных физических свойствах пылевого аэрозоля: оптической глубине, размере частиц, показателе преломления, вертикальном распределении [30]. Ни один наземный прибор не обладает столь широкими возможностями синхронного многопараметрического измерения.

Существенную роль играет и исторический архив спутниковых данных. Непрерывные ряды наблюдений сенсора AVHRR начинаются с 1978 года, а спутника MODIS — с 2000 года, что открывает возможности для анализа долгосрочных тенденций пылевой активности на Аравийском полуострове в контексте изменений климата и землепользования. Ни один другой метод не предоставляет столь продолжительных и пространственно однородных рядов данных об атмосферном аэрозоле в данном регионе.

Вместе с тем методы спутникового дистанционного зондирования имеют ряд существенных ограничений, о которых необходимо помнить при интерпретации результатов. Во-первых, зондирование в оптическом диапазоне невозможно сквозь плотную облачность, а в тепловом инфракрасном диапазоне — при незначительном контрасте температур пыли и подстилающей поверхности. Во-вторых, восстановление характеристик аэрозоля над яркими пустынными поверхностями технически значительно сложнее, чем над тёмными поверхностями (океан, влажные почвы), и сопряжено с повышенными погрешностями. В-третьих, орбитальные аппараты с полярной орбитой обеспечивают лишь один–два пролёта в сутки над данной точкой, что недостаточно для наблюдения за быстро развивающимися событиями [31]. Понимание этих ограничений принципиально важно для правильной организации исследования и корректной оценки достоверности получаемых результатов.

2.2 Спутниковые системы и сенсоры, применяемые для анализа пыльных бурь

За последние три десятилетия для изучения пыльных бурь был задействован широкий круг спутниковых систем, различающихся орбитой, пространственным и временным разрешением, спектральным диапазоном и принципом работы. Ниже рассмотрены основные инструменты, применяемые в современных исследованиях пыльных бурь на Аравийском полуострове.

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) — многоканальный радиометр умеренного разрешения, установленный на спутниках Terra (запуск в 1999 г.) и Aqua (2002 г.) NASA. Сенсор регистрирует излучение в 36 спектральных каналах в диапазоне от 0,4 до 14,4 мкм с пространственным разрешением 250 м (каналы 1–2), 500 м (каналы 3–7) и 1000 м (каналы 8–36). Полоса обзора составляет 2330 км, что обеспечивает практически ежесуточное глобальное покрытие. Для исследования пыльных бурь наибольшее значение имеют стандартные продукты оптической глубины аэрозоля (MOD04/MYD04), доступные в архиве NASA Earthdata начиная с 2000 года. Свыше 20-летний непрерывный ряд наблюдений MODIS является на сегодняшний день основным источником информации о долгосрочной изменчивости пылевой активности на Аравийском полуострове.

VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) — сенсор нового поколения, установленный на спутниках Suomi NPP (2011 г.) и NOAA-20 (2017 г.). Он является преемником MODIS с улучшенными характеристиками: пространственное разрешение дневных каналов составляет 375 м и 750 м при ширине полосы обзора 3040 км. Продукты AOD VIIRS (AERDB_D3_VIIRS) разработаны с применением алгоритма Deep Blue, адаптированного для работы над яркими аридными поверхностями, и хорошо согласуются с данными MODIS при верификации по AERONET [32].

SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) — многоканальный имиджер, работающий на борту геостационарных спутников Meteosat серии MSG (Meteosat Second Generation) Европейского агентства по исследованию космического пространства (ESA). В отличие от полярноорбитальных аппаратов, Meteosat обеспечивает непрерывный мониторинг с повторяемостью 15 минут, что принципиально важно для наблюдения за быстро развивающимися пыльными бурями. Сенсор работает в 12 спектральных каналах; для выделения пылевых аэрозолей разработан специализированный метод на основе разностей яркостных температур в каналах 8.7, 10.8 и 12.0 мкм — так называемый «пылевой индекс BTD» (Brightness Temperature Difference) [33].

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) — спутник NASA/CNES, запущенный в 2006 году в составе группировки A-Train. Главный прибор — двухволновой поляризационный лидар CALIOP (532 и 1064 нм) — позволяет восстанавливать вертикальные профили обратного рассеяния и деполяризации с разрешением 30–60 м по вертикали и 333 м по горизонтали. Данные CALIPSO незаменимы для изучения высотной структуры пылевых слоёв, разделения пыли, дыма и морской соли, а также для верификации результатов численного моделирования переноса аэрозолей [34]. Существенным ограничением CALIPSO является узкая полоса обзора лидара (около 70 м), которая обеспечивает повторное наблюдение над конкретной точкой лишь каждые 16 суток.

MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) — девятикамерный сенсор на борту спутника Terra, регистрирующий отражение под девятью фиксированными углами зондирования от -70° до $+70^\circ$ от надира. Многоугловые измерения позволяют восстанавливать форму частиц аэрозоля и разделять вклады различных типов аэрозолей в суммарное ослабление излучения. Применительно к аравийской пыли данные MISR использовались

для оценки несферичности частиц и верификации модельных параметров рассеяния [35].

Среди перспективных инструментов необходимо упомянуть сенсор TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) на борту спутника Sentinel-5P (ESA, запуск 2017 г.), обеспечивающий восстановление AOD в ультрафиолетовом диапазоне с пространственным разрешением $3,5 \times 5,5$ км — существенно более высоким, чем у MODIS. В сочетании с данными лидара Aeolus (ESA, 2018 г.), измеряющего скорость ветра в атмосферном столбе, TROPOMI открывает новые возможности для изучения транспорта пыли на Аравийском полуострове [36].

2.3 Спектральные индексы и алгоритмы выделения пылевых аэрозолей

Разработка алгоритмов, позволяющих надёжно выделять пыльные аэрозоли на спутниковых снимках, представляет собой одну из центральных задач прикладной дистанционной спектроскопии атмосферы. Сложность решения этой задачи обусловлена несколькими факторами: яркость пустынной поверхности в видимом диапазоне близка к яркости пылевого слоя, что затрудняет выделение аэрозольного сигнала; спектральные свойства пыли существенно варьируют в зависимости от минералогического состава; наличие тонких слоёв перистых облаков может имитировать пылевой сигнал [37].

Алгоритм Deep Blue (DB) разработан специально для восстановления AOD над яркими аридными поверхностями и является стандартным продуктом MODIS. Название отражает принцип работы: в голубом (синем) диапазоне спектра (0,412 и 0,470 мкм) пустынные поверхности относительно тёмные по сравнению с видимым диапазоном, что позволяет выделить аэрозольный вклад. Алгоритм использует предварительно составленную базу данных отражательной способности подстилающей поверхности и

итерационное инвертирование уравнения переноса излучения. Точность восстановления AOD над аравийскими пустынями составляет $\pm (0,03 + 0,05 \times \text{AOD})$ при ясном небе [38].

Алгоритм Dark Target (DT) оптимизирован для зондирования над тёмными поверхностями (моря, влажные почвы, растительность) и применяется над прибрежными районами Аравийского полуострова и акваториями Персидского залива и Аравийского моря. В версии Collection 6 MODIS реализован комбинированный продукт Dark Target + Deep Blue (DTB), обеспечивающий наилучшие оценки AOD как над тёмными, так и над яркими поверхностями в рамках единого алгоритма [39].

Для количественной оценки пространственного распределения и оптических свойств поглощающих аэрозолей в ультрафиолетовом спектральном диапазоне применяется индекс аэрозольного поглощения (Aerosol Index, AI), а также его специализированная модификация — ультрафиолетовый аэрозольный индекс (UVAI), рассчитываемый по данным спектрометра OMI (Ozone Monitoring Instrument), функционирующего на борту орбитальной платформы Aura. Физический принцип детекции с использованием AI и UVAI основан на регистрации индуцированного поглощением аэрозольных частиц изменения спектрального хода восходящего потока рассеянного ультрафиолетового излучения. Математически ультрафиолетовый аэрозольный индекс определяется как нормированное отношение измеренной интенсивности фонового излучения на длине волны λ к расчетной интенсивности, полученной для чисто молекулярной (рэлеевской) атмосферы в рамках модели Lambertian Equivalent Reflectance (LER):

$$\text{UVAI} = -100 \times [\log_{10} (I(\lambda)^{\text{ИЗМ}} / I(\lambda)^{\text{расч}})]$$

где $(\lambda)^{\text{ИЗМ}}$ — интенсивность излучения, зарегистрированная сенсором на длине волны λ (обычно 354 или 388 нм), $(\lambda)^{\text{расч}}$ — теоретическая

интенсивность излучения, рассеянного свободной от аэрозолей атмосферой при аналогичных геометрических условиях зондирования и отражательной способности подстилающей поверхности. Положительные значения индекса ($UVAI > 0.5$) однозначно свидетельствуют о присутствии в атмосферном столбе поглощающего аэрозоля (минеральной пустынной пыли, содержащей оксиды железа, или мелкодисперсного дыма), при этом величина индекса демонстрирует линейную зависимость от оптической плотности аэрозольного слоя и высоты его залегания. Методологическое преимущество использования $UVAI$ в аридных регионах заключается в его инвариантности по отношению к типу подстилающей поверхности, что позволяет устойчиво идентифицировать высотные пылевые шлейфы над яркими поверхностями пустынь и солончаков, где алгоритмы видимого диапазона испытывают насыщение или характеризуются повышенной погрешностью.

В условиях отсутствия естественной освещенности (в ночной период) или при экстремальной оптической плотности пылевого облака, исключающей применение методов оптического и ультрафиолетового зондирования, детекция минерального аэрозоля осуществляется в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра на основе расчетного показателя Dust Score, генерируемого по данным гиперспектрального атмосферного зондера AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) на спутнике Aqua. Методика вычисления Dust Score базируется на анализе спектрального хода коэффициента поглощения силикатных минералов, составляющих основу пустынной пыли. Пылевые аэрозоли обладают свойством селективного поглощения теплового излучения Земли, выражающегося в существенно более сильном ослаблении радиации на длине волны 8.7 мкм по сравнению с каналами 10.8 и 12.0 мкм. Физическим измерителем интенсивности пылевого феномена выступает метод разности яркостных температур (Brightness Temperature Difference, BTD):

$$BTD = T_{\lambda} (10.8) - T_{\lambda} (12.0)$$

где T_y — яркостная температура в соответствующем ИК-канале. Для чистой атмосферы или капельной облачности величина BTD принимает строго положительные значения, тогда как при появлении слоев минеральной пыли, вследствие аномальной дисперсии показателя преломления силикатов, разность температур становится отрицательной. Алгоритм Dust Score интегрирует показатели BTD по нескольким опорным каналам ИК-диапазона и трансформирует их в безразмерный индекс интенсивности запыленности (в диапазоне от 400 до 500+ K). При интерпретации ночных показателей Dust Score учитывается методическое ограничение сенсора, связанное с суточным ходом радиационного контраста: уменьшение разности температур между подстилающей поверхностью пустыни и пылевым аэрозольным слоем в ночные часы приводит к закономерному снижению количества информативных пикселей и недооценке площади распространения разреженного аэрозоля.

Метод яркостных температур (Brightness Temperature Difference, BTD) применяется в тепловом инфракрасном диапазоне и не зависит от освещённости поверхности, что делает его пригодным для использования как днём, так и ночью. Пылевые аэрозоли обладают характерной особенностью: они поглощают излучение сильнее на длине волны 8,7 мкм, чем на 10,8 и 12,0 мкм, тогда как для чистой атмосферы наблюдается обратное соотношение. Следовательно, разность яркостных температур ($BTD_{10.8} - BTD_{12.0}$) и ($BTD_{8.7} - BTD_{10.8}$) принимает отрицательные значения в областях с пылью и положительные в облачных и чистых областях [40]. Этот метод активно используется применительно к данным геостационарного сенсора SEVIRI для непрерывного мониторинга пыльных бурь в регионе.

Индекс аэрозольного поглощения (Aerosol Index, AI) — безразмерная величина, вычисляемая из отношения измеренной и расчётной (для молекулярной атмосферы) отражательных способностей в ультрафиолетовом диапазоне. Данные по AI исторически получались с сенсоров TOMS (1978–

2005), SCIAMACHY, OMI, а в настоящее время — с TROPOMI. Поскольку AI чувствителен к поглощающим аэрозолям (пыль, дым) и слабо зависит от характера подстилающей поверхности, он является ценным дополнительным индикатором пыльных событий, позволяющим проследить пылевые шлейфы над облаками [41].

В последние годы для обнаружения пыльных бурь в реальном времени успешно применяются алгоритмы машинного обучения — случайные леса, нейронные сети, алгоритмы опорных векторов, — обучаемые на исторических спутниковых архивах с использованием верифицированных данных наземных наблюдений в качестве обучающей выборки. Ряд работ показал, что ансамблевые методы машинного обучения обеспечивают точность обнаружения пыльных событий, сопоставимую или превосходящую физические алгоритмы, при значительно меньших вычислительных затратах [42]. Данное направление представляется весьма перспективным для оперативного мониторинга пыльных бурь на Аравийском полуострове.

2.4 Верификация спутниковых данных по наземным наблюдениям

Достоверность спутниковых продуктов AOD и других характеристик пылевого аэрозоля требует обязательной верификации на основе независимых измерений. Главным инструментом верификации служит глобальная сеть наземных солнечных фотометров AERONET (AErosol RObotic NETwork), разработанная и поддерживаемая NASA совместно с рядом международных партнёров. Сеть объединяет более 500 станций по всему миру и обеспечивает автоматические измерения прямой солнечной радиации и диффузного рассеяния в 8–9 спектральных каналах от 340 до 1640 нм с периодичностью около 15 минут. На основании этих измерений восстанавливаются AOD, параметры размерного распределения аэрозоля, комплексный показатель

преломления и ряд других оптических характеристик с погрешностью AOD не более $\pm 0,01-0,02$ [43].

На Аравийском полуострове и в сопредельных районах действует ряд станций AERONET, данные которых имеют первостепенное значение для верификации спутниковых продуктов в регионе. К их числу относятся станции в Эр-Рияде (Саудовская Аравия), Абу-Даби (ОАЭ), Маскате (Оман), Бахрейне, Кувейте, а также ряд станций Иордании. Средние значения AOD на длине волны 500 нм на этих станциях в периоды активных пыльных бурь регулярно превышают 1,5–3,0, что в разы выше фоновых значений и хорошо коррелирует со спутниковыми оценками [44].

Сравнительный анализ спутниковых продуктов AOD (MODIS Deep Blue, MODIS Dark Target) с измерениями AERONET на аравийских станциях показывает, что алгоритм Deep Blue в целом успешно восстанавливает AOD над данным регионом: коэффициент корреляции между спутниковыми и наземными значениями составляет 0,85–0,92, а доля совпадений в пределах ожидаемого диапазона погрешности — 60–75% [32]. Вместе с тем при AOD > 2,0 (условия экстремальных пыльных бурь) спутниковые алгоритмы склонны к занижению истинных значений, что связано с насыщением сигнала и неточностью параметров рассеяния, принятых в радиационно-передаточных расчётах.

Помимо AERONET, для верификации используются данные наземных метеорологических наблюдений — записи о видимости, скорости ветра, данные пылемеров (dust samplers) и лидаров наземного базирования. Особую ценность представляют детальные данные аэрологического зондирования (радиозондовые наблюдения), позволяющие проверять вертикальные профили ветра, используемые при анализе условий формирования пыльных бурь. В ряде исследований для верификации использовались данные лидарных станций, расположенных в ОАЭ, что позволяло сопоставить вертикальные

профили аэрозоля, восстановленные по данным CALIPSO, с независимыми наземными измерениями [45].

система верификации спутниковых данных о пыльных аэрозолях на Аравийском полуострове включает несколько взаимодополняющих уровней: наземные фотометры AERONET, метеорологические наблюдения, наземные лидары и данные радиозондирования. Комплексное использование этих источников позволяет как оценивать точность спутниковых алгоритмов, так и повышать её путём региональной адаптации параметров.

Для независимого подтверждения микрофизических и гранулометрических характеристик взвешенных частиц, идентифицируемых по спутниковым снимкам как пылевые шлейфы, привлекаются данные спектрального параметра Энгстрема (Ångström Exponent, AE), измеряемого наземными солнечными фотометрами глобальной сети AERONET. Показатель Энгстрема характеризует спектральную зависимость аэрозольной оптической толщи и математически выражается из эмпирического закона Энгстрема при сопоставлении двух фиксированных длин волн излучения λ_1 и λ_2 (в настоящем исследовании — 440 и 870 нм):

$$AE = - [\ln (AOD(\lambda_1) / AOD(\lambda_2))] / [\ln (\lambda_1 / \lambda_2)]$$

Величина параметра Энгстрема обратно пропорциональна среднему размеру аэрозольных частиц, участвующих в рассеянии света. Значения $AE \leq 0.5$ однозначно указывают на доминирование в атмосфере крупнодисперсной фракции минерального аэрозоля (пыль, крупный алеврит), что позволяет надежно дифференцировать естественные пыльные бури от антропогенного мелкодисперсного загрязнения или дымов сжигания попутного газа на нефтепромыслах, для которых характерны значения $AE > 1.0$. Совместный анализ полей AOD и AE обеспечивает извлечение достоверной микрофизической информации об интенсивности эрозионных процессов на подстилающей поверхности.

2.5 Методология использования данных реанализа и синоптического анализа

С целью установления макромасштабных механизмов формирования, динамики развития и путей трансграничного переноса пылевых аэрозолей в работе реализован комплексный подход, сочетающий спутниковое зондирование с приземным синоптическим анализом и данными глобального реанализа нового поколения MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, версия 2), разрабатываемого Офисом глобального моделирования и ассимиляции данных (GMAO) NASA. В качестве базового количественного параметра запыленности по данным MERRA-2 используется интегральная масса пыли в атмосферном столбе (Dust Column Mass, DCM, мг/м^2), рассчитываемая путем вертикального интегрирования концентраций пяти фракций минерального аэрозоля (в диапазоне радиусов от 0.1 до 10 мкм) с учетом гидродинамического переноса и турбулентного перемешивания в блоке GO CART (Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport), интегрированном в общую прогностическую систему GEOS-5.

Синоптический метод включает детальный пространственно-временной анализ приземных карт погоды, карт геопотенциала изобарической поверхности 850 гПа, а также дискретных метеорологических данных синоптических станций в международном кодовом формате SYNOP и регулярных сводок погоды для авиации METAR. Основными диагностическими критериями возникновения пылевых явлений при синоптическом анализе служат конфигурации полей давления (изобар), наличие барических ложбин, зон сближения изобар (барических градиентов) и падения приземной горизонтальной видимости ниже 1000 м, сопровождаемое регистрацией специализированных кодов текущей погоды (+DS — сильная пыльная буря, DS — умеренная пыльная буря).

Для выявления региональных климатических закономерностей ветрового режима и оценки повторяемости генерирующих пыль циркуляционных механизмов применяется метод статистического обобщения многостанционных рядов наблюдений для 30 задокументированных экстремальных пыльных событий на Аравийском полуострове. Повторяемость конкретного типа синоптической ситуации (P , %) рассчитывается по формуле:

$$P = (n / N) * 100\%$$

где n — число случаев фиксации исследуемой барической структуры (например, барической ложбины или седловины) при пыльных явлениях, N — суммарное количество проанализированных синоптических кейсов ($N = 30$). Распределение скоростей и направлений воздушных потоков структурируется по 8 основным румбам с последующим построением векторных диаграмм (роз ветров), отражающих повторяемость направлений ветра и средние скорости дефляции грунта при различных циркуляционных режимах.

Проведённый обзор методов дистанционного зондирования, применяемых для изучения пыльных бурь, позволяет сформулировать следующие выводы. Спутниковые методы являются на сегодняшний день единственным инструментом, обеспечивающим регулярный пространственно непрерывный мониторинг пылевой активности на Аравийском полуострове. Для комплексного исследования пыльных бурь необходимо совместное использование данных нескольких сенсоров: полярноорбитальных (MODIS, VIIRS) — для восстановления AOD с умеренным пространственным разрешением, геостационарных (SEVIRI/Meteosat) — для непрерывного слежения за эволюцией пыльных событий, лидарных (CALIPSO) — для анализа вертикальной структуры аэрозольного слоя. Алгоритм Deep Blue является наиболее обоснованным выбором для восстановления AOD над аридными районами Аравийского полуострова, однако при экстремально высоких значениях AOD требует осторожной интерпретации. Указанные

методологические принципы положены в основу анализа, проводимого в последующих главах настоящей работы.

3. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПЫЛЬНЫХ БУРЬ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СНИМКИ

3.1 Пыльные бури в Вади-эль-Давасир 29.04.2024

3.1.1 Анализ синоптической ситуации

Представлена синоптическая карта поверхности (рис 3.1) атмосферы с нанесением данных наземных наблюдательных станций, изобар и барических центров за 29.04.2024, 06:00 UTC.

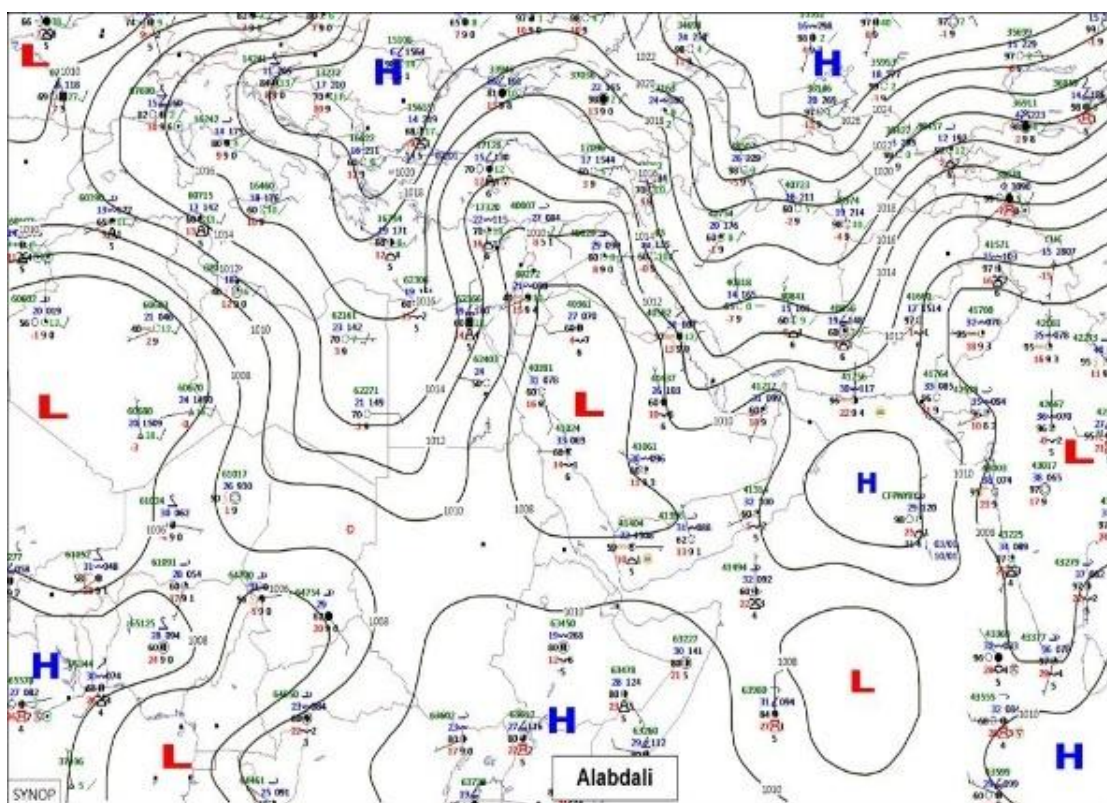


рис 3.1- Приземная синоптическая карта на 29.04.2024

Барическая обстановка над Аравийским полуостровом характеризуется ложбиной низкого давления (область пониженного геопотенциала), вытянутой с севера на юг вдоль меридиана $\sim 42\text{--}45^\circ$ в.д. Изобара 1010 гПа охватывает обширную зону центральной Аравии, тогда как к юго-западу располагается ещё более низкое давление. Над Средиземноморьем и Ираком прослеживается серия ложбин и гребней, обеспечивающих меридиональный тип циркуляции. На западном фланге карты (над Африкой) расположен мощный антициклон, что усиливает адвекцию сухого континентального воздуха в сторону полуострова.

Данные синоптических станций непосредственно в районе центральной Аравии (например, 41396: 40437 и другие вблизи $21\text{--}24^\circ$ с.ш.) указывают на северный ветер. Наличие значительного числа станций с ветром северного и северо-западного направлений на всём полуострове подтверждает режим шамалья. Станция 41061 ($\sim 20\text{--}21^\circ$ с.ш., 45° в.д.), Вади ад-Давасир, показывает ветер с северо-западного направления, что согласуется с данными MERRA-2 на 850 гПа. Положение ложбины над центральной Аравией является ключевым синоптическим фактором: именно в зоне ложбины формируются условия для конвергенции воздушных потоков и интенсификации пылеподъёма, что зафиксировано всеми спутниковыми продуктами за этот день.

Карта отображает скорость и направление ветра на изобарическом уровне 850 гПа (~ 1500 м н.у.м.) (рис 3.2) совместно с геопотенциальными высотами (дам) по данным MERRA-2 за тот же срок — 29.04.2024, 09Z.

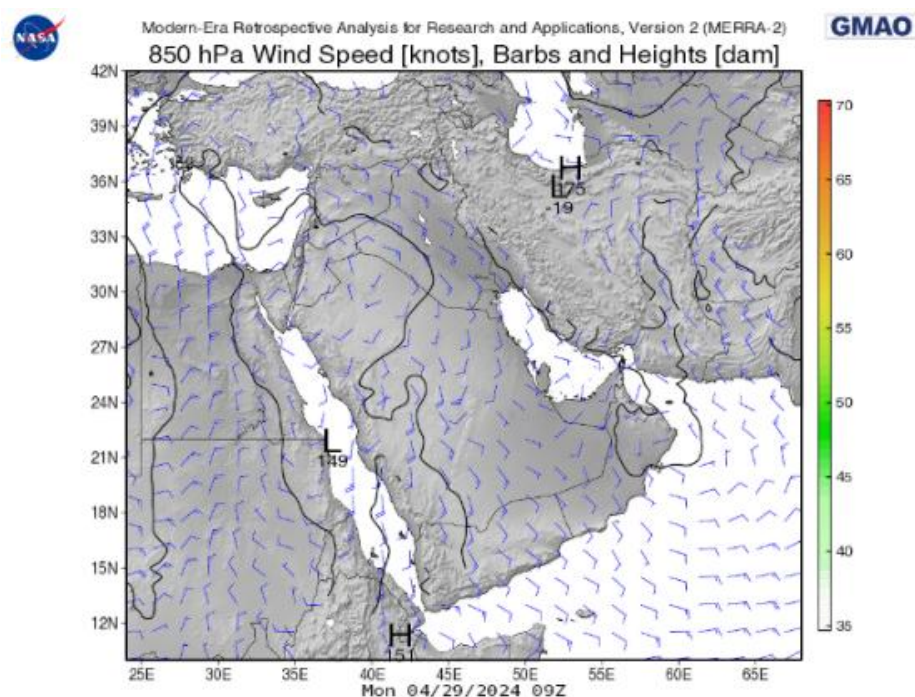


рис 3.2- Поле Ветра на 850 гПа (Merra 2) на 29.04.2024

Барическая обстановка характеризуется наличием трёх выраженных центров: антициклон (Н, 175 дам) над северо-восточным Ираном, термический циклон (L, 149 дам) над Красным морем, а также антициклон (Н, 151 дам) над южной Аравией. Данная конфигурация формирует устойчивый меридиональный барический градиент, обуславливающий северо-западный и северный перенос воздуха над полуостровом.

Барбы ветра над районом Вадии ад-Давасир ($\sim 20\text{--}22^\circ$ с.ш., $44\text{--}46^\circ$ в.д.) указывают на преобладающий северо-западный поток со скоростями 10–20 узлов. Над северной Аравией и Ираком скорости достигают 15–25 узлов. Следует обратить внимание на изолинию геопотенциала 149 дам, охватывающую обширную депрессионную зону в центральной Аравии, — именно в этой зоне расположен Вадии ад-Давасир. Конвергенция потоков у оси этой депрессии создаёт условия для усиленного пылеподъёма с аллювиальных равнин котловины.

Скорости ветра на 850 гПа в целом по полуострову не превышают 35 узлов (нижней границы цветовой шкалы), то есть ни одна из изображённых

зон не достигает 35 узлов. Это указывает на умеренную скорость синоптического переноса, тогда как основной вклад в пылеподъём 29 апреля вносили приземные конвективные и термические механизмы, обозначенные депрессионной структурой поля геопотенциала.

3.1.2 Анализ данных реанализа Merra 2

На карте (рис 3.3) представлено поле интегрального запаса пыли в атмосферном столбе (Dust Column Mass, DCM) по данным реанализа MERRA-2 (NASA GMAO) за 29 апреля 2024 г., 09:00 UTC. Цветовая шкала охватывает диапазон 0–300 мг/м², причём значения выше порогового предела (>300 мг/м²) отображаются насыщенным малиново-пурпурным цветом.

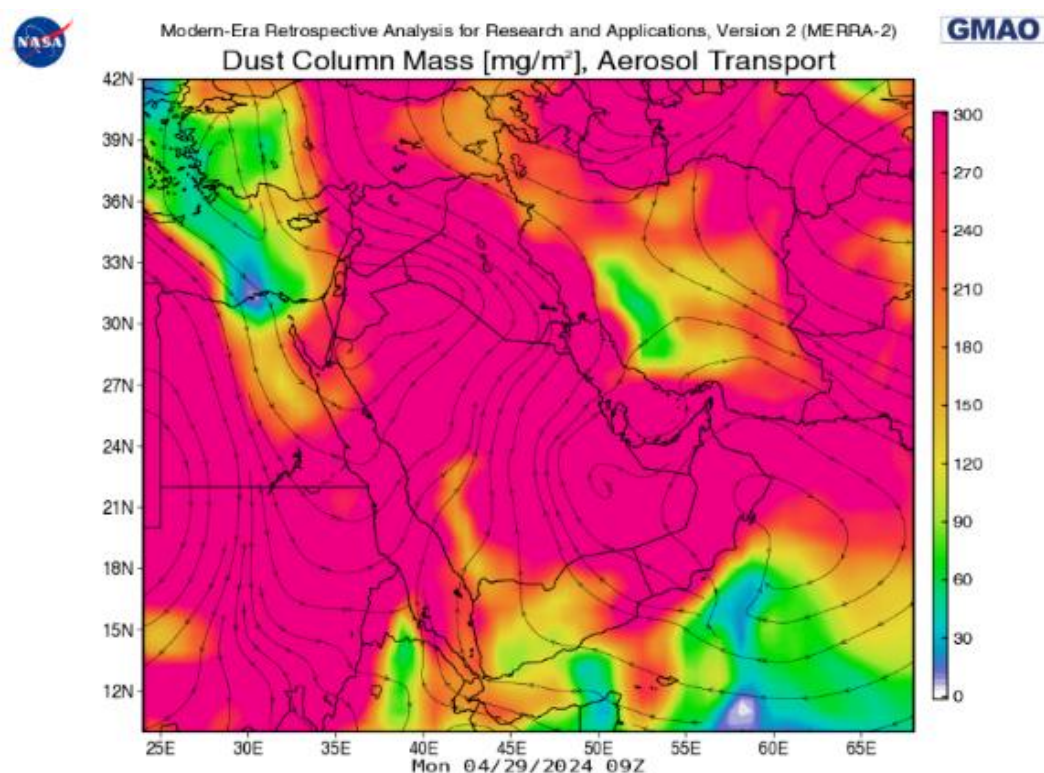


рис 3.3 - Масса пыли в столбе атмосферы (мг/м²) и аэрозольный перенос на 29.04.2024 (MERRA-2)

Над районом Вади ад-Давасир и прилегающими территориями центральной и северной Саудовской Аравии фиксируется сплошной пылевой покров с DCM, существенно превышающим 300 мг/м^2 . Эта зона охватывает практически весь Аравийский полуостров — от 18° до 34° с.ш. и от 36° до 58° в.д. Внутри данного массива выделяются ядра с несколько меньшими значениями (оранжево-жёлтые тона, $90\text{--}210 \text{ мг/м}^2$): одно расположено над южной Аравией, второе — над Ираком и Сирией, третье — над Ираном. Эти ядра соответствуют зонам частичного рассеяния или оседания пыли.

Траектории аэрозольного переноса, обозначенные стрелками, ориентированы над центральной Аравией преимущественно с северо-запада на юго-восток, что соответствует режиму шамального потока. В южной части полуострова наблюдается циклонический изгиб траекторий, указывающий на взаимодействие шамала с термической депрессией. На северо-западе региона DCM снижается до $30\text{--}90 \text{ мг/м}^2$ (зелёные тона), что свидетельствует о меньшей аэрозольной нагрузке в этой зоне. Таким образом, 29 апреля 2024 г. над Аравийским полуостровом в целом и над Вади ад-Давасир в частности наблюдалась интенсивная пылевая обстановка с исключительно высокими значениями DCM.

3.1.3 Анализ пылевых шлейфа

На снимке (рис 3.4) в истинных цветах, полученном сенсором VIIRS спутника NOAA-21, охвачена территория Аравийского полуострова и прилегающих акваторий: Красного моря, Персидского залива и Аравийского моря. Дата и время пролёта соответствуют утренним часам 29 апреля 2024 г.

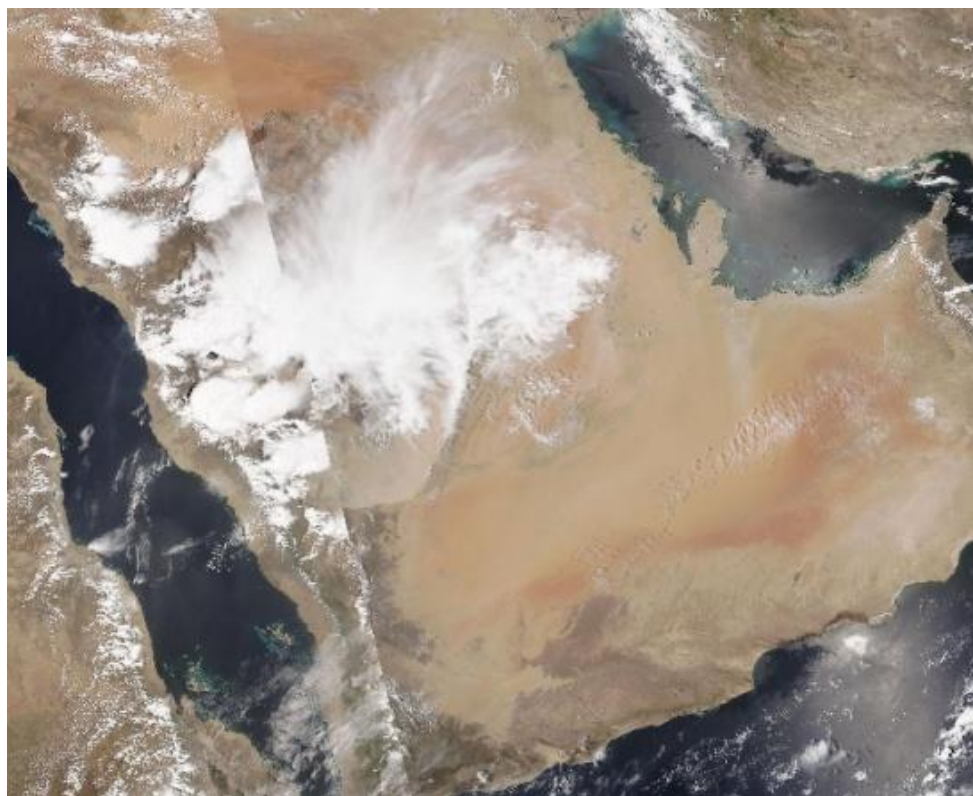


рис 3.4 - Спутниковая снимка на 29.04.2024 (NOAA-21)

Доминирующая структура: пыльная буря с конвективным компонентом. Центральным и структурно наиболее значимым элементом снимка является гигантское белое облако неправильной формы, занимающее значительную часть западной и центральной Аравии. По морфологическим признакам данная структура представляет собой сложную систему, объединяющую два компонента.

Конвективная облачность: в западной части массива отчётливо различимы башнеобразные кучево-дождевые облака (Cumulonimbus) с хорошо развитыми вертикальными структурами и ярко-белым оптически плотным куполом. Наковальни этих облаков, ориентированные на восток и северо-восток, указывают на активный восходящий поток с последующим растеканием в верхней тропосфере. Это нетипичное явление для конца апреля в центральной Аравии и свидетельствует об аномально нестабильной атмосфере в тот период.

Пылевой шлейф: из-под конвективных облаков на восток и юго-восток распространяется широкий волокнисто-диффузный шлейф — характерный по оттенку (кремово-белый, с едва заметным желтоватым тоном), принципиально отличающийся по текстуре от кристаллического белого цвета конвективной облачности. Именно этот шлейф представляет собой пылевой фронт, переносимый шамальным потоком. Волокнистая текстура шлейфа, а также его значительная горизонтальная протяжённость свидетельствуют о том, что пыль распределена в широком слое нижней и средней тропосферы.

Пространственное распределение пыли: К востоку и юго-востоку от основного облачно-пылевого комплекса поверхность Аравийского полуострова приобретает насыщенный охристо-бежевый цвет, существенно отличающийся от естественного цвета аридной поверхности в районах без пыли. Этот окрас обусловлен взвешенной пылью в приземном слое атмосферы: поверхность видна сквозь слой аэрозоля, однако её цвет и контрастность заметно изменены. Максимальная плотность приземного пыльного слоя наблюдается в районе $\sim 21\text{--}24^\circ$ с.ш., $44\text{--}52^\circ$ в.д., что соответствует котловинам Вади ад-Давасир, Руб-эль-Хали и межгорным равнинам центрального Неджда.

В пределах этой зоны отчётливо прослеживается ряд параллельных светлых полос с незначительно повышенной яркостью — гравитационные волны или гребни пылевого потока, сформированные турбулентным сдвигом ветра. Эти структуры, ориентированные с северо-запада на юго-восток, визуализируют направление переноса пыли и подтверждают его устойчивость в данный срок.

Граница пылевого фронта и Вади ад-Давасир: передний край пылевого фронта, распространяющегося с запада на восток, пролегает приблизительно по меридиану $\sim 48\text{--}50^\circ$ в.д. Восточнее этой границы поверхность постепенно светлеет, хотя диффузный аэрозольный налёт сохраняется и там. Район Вади ад-Давасир ($\sim 20\text{--}21^\circ$ с.ш., $44\text{--}46^\circ$ в.д.) оказывается в зоне наиболее плотного

пылевого покрытия — непосредственно под основным шлейфом. Это согласуется с данными METAR OEWD с видимостью 100 м.

Состояние поверхности и признаки деградации: в южной части снимка, ниже основного пылевого покрова, отдельные участки поверхности демонстрируют крайне однородный, «выбеленный» цвет без каких-либо признаков растительного покрова — характерная картина для аридных поверхностей (такыры, солончаки, крупнозернистые пески). Отсутствие зелёного тона на всей внутренней территории полуострова подтверждает полное отсутствие или ничтожно малую площадь орошаемой или естественной растительности в области распространения пыльной бури. Береговые зоны Красного моря и частично Йемена сохраняют отдельные пятна зеленовато-серого цвета, указывающие на горную растительность, недоступную для пылевого переноса из-за орографического барьера.

Рассматриваемый снимок документирует пыльную бурю исключительного масштаба, сформированную при взаимодействии шамального потока с конвективными ячейками над горами Хиджаз и Асир. Конвективный апдрафт обеспечивал вертикальный подъём пыли до уровней выше 5–7 км, что объясняет столь значительную горизонтальную протяжённость шлейфа. Район Вади ад-Давасир находился в зоне прямого воздействия плотного приземного пылевого потока, что и обусловило экстремальные условия видимости (100 м), зафиксированные в METAR OEWD в 10:00 UTC.

На многоспектральном снимке (рис. 3.5) в схеме Dust RGB отчётливо разграничены два домена. Западная половина — красно-коричневый массив минеральной пыли, охватывающий Неджд и центральную Аравию. В северо-западном секторе тёмные структуры с чёрными вкраплениями соответствуют конвективным ячейкам (Cb), питающим пылевой подъём. Восточная половина

— насыщенные голубые тона над Оманом и Персидским заливом, указывающие на относительно чистую атмосферу.

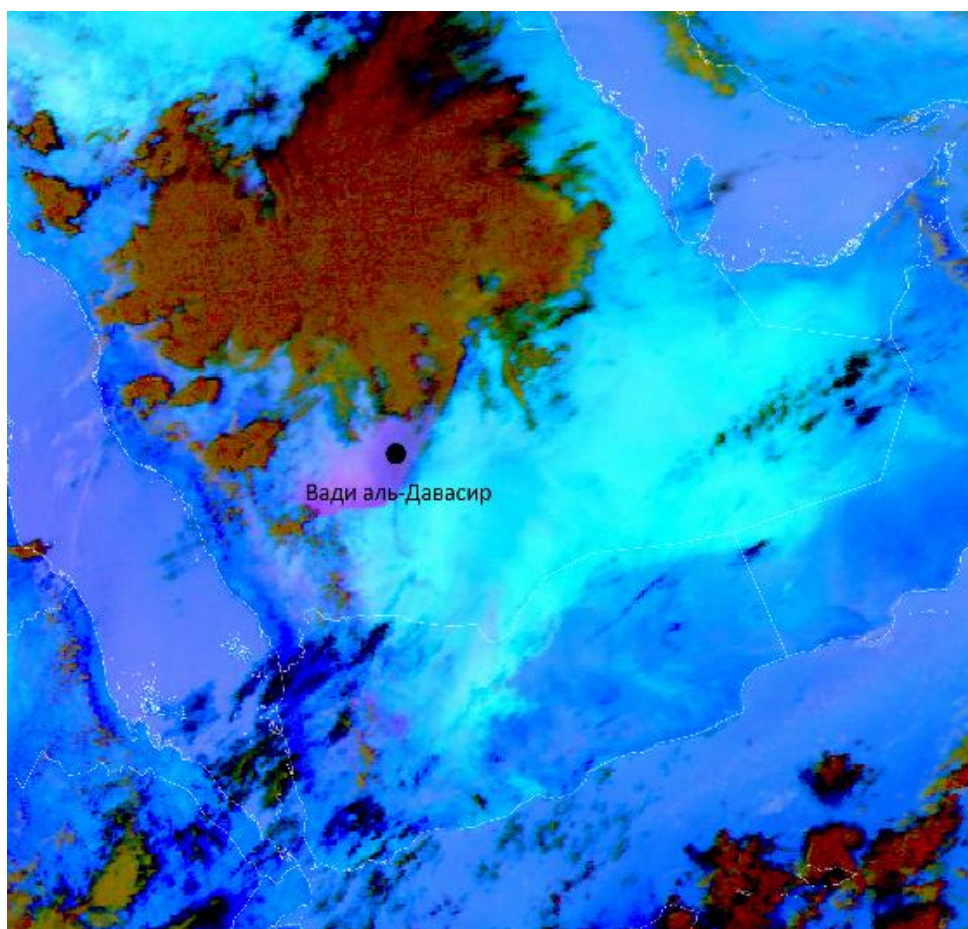


рис 3.5 - Спутниковый снимок Meteosat/MSG, канал аэрозоля пыли на 29.04.2024

Вади ад-Давасир (чёрная точка) располагается на границе двух доменов в розовато-пурпурной зоне — спектральная сигнатура переднего края активного пылевого фронта при умеренной оптической толщине столба. Это согласуется с METAR OEWD 10:00 UTC: видимость 100 м, ветер 28 узлов, явление +DS. Приземные концентрации пыли уже были критическими, тогда как тыловое ядро максимального DCM оставалось западнее.

Граница пылевого фронта проходит по меридиану $\sim 43\text{--}46^\circ$ в.д., имеет неровный изрезанный характер с языками аэрозоля, проникающими на восток по долинам рельефа.

Снимок (рис. 3.6) в естественных цветах, полученный сенсором VIIRS на борту спутника NOAA-21 и визуализированный в платформе NASA Worldview. Дополнительным слоем нанесены данные оптической толщины аэрозоля (AOD) по сети AERONET на длине волны 500 нм, отображаемые цветными кружками от жёлтого (малые значения) до тёмно-красного ($AOD > 3,0$ –5,0).

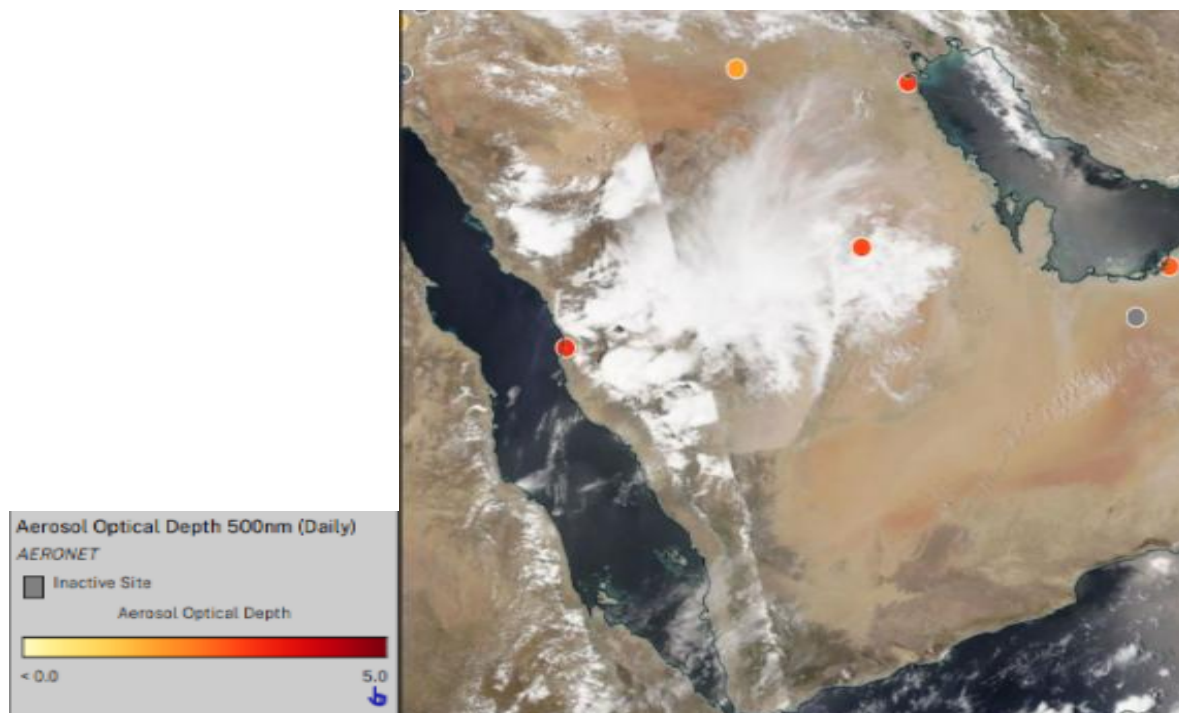


рис 3.6 - Аэрозольная оптическая толщина на длине волны на 29.04.2024 500 нм (AERONET)

На снимке в истинных цветах центральная часть Аравийского полуострова покрыта гигантским пылевым массивом белесовато-серого цвета. В отличие от облаков, данная структура имеет размытые, диффузные границы и не отбрасывает теней, что является диагностическим признаком высоко атмосферного пылевого слоя.

На слое AERONET обращают на себя внимание два кружка тёмно-красного цвета ($AOD > 3,0$): один расположен над центральной Аравией, второй — в районе северного побережья Персидского залива. Это anomalно

высокие значения оптической толщины, при которых прямое солнечное излучение у поверхности ослабляется в несколько раз, а горизонтальная видимость снижается до нескольких сотен метров. Кружки оранжевого и жёлто-оранжевого цвета в периферийных зонах (Красное море, Оман) указывают на значения AOD в диапазоне 1,0–2,5 — также весьма высокие. Такое распределение AOD подтверждает, что 29 апреля 2024 г. в центральной Аравии произошла пыльная буря исключительной интенсивности, охватившая и район Вадии ад-Давасир.

На снимке (рис. 3.7) к подложке в истинных цветах (NOAA-21/VIIRS) добавлен слой параметра Ангстрёма (Ångström Exponent, AE) на длине волны 440–870 нм по сети AERONET. Параметр Ангстрёма является индикатором размера доминирующих аэрозольных частиц: значения $AE < 1$ соответствуют крупным частицам (пыль, морская соль), тогда как $AE > 1,0$ характерно для мелкодисперсных аэрозолей (дымовые частицы, городское загрязнение).

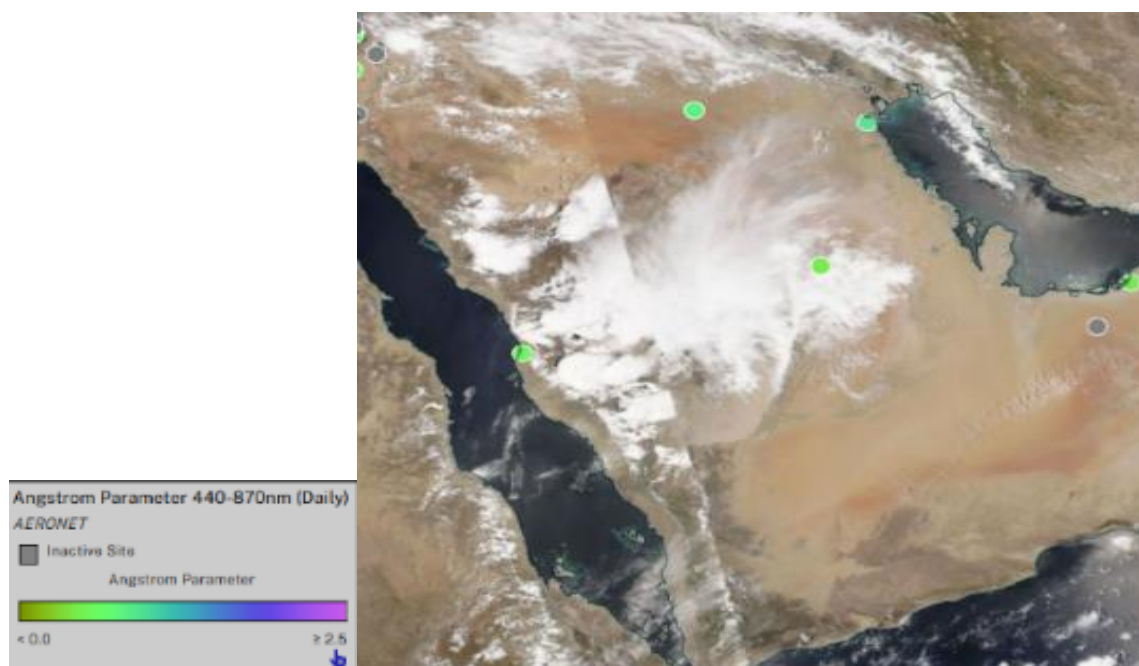


рис 3.7 - Параметр в ангстремах на 29.04.2024 (440–870 нм) (AERONET)

Кружки станций AERONET на данном снимке окрашены в зелёный цвет, что соответствует значениям AE в нижней части шкалы (0,0 до ~0,5). Это однозначно указывает на преобладание крупнодисперсного минерального

аэрозоля — то есть именно пыли, а не иных видов загрязнения атмосферы. Столь низкие значения АЕ при одновременно высоком AOD (установленном по предыдущему слою) являются классической спектральной сигнатурой интенсивной пыльной бури с преобладанием частиц диаметром $> 5\text{--}10$ мкм.

Пространственное положение «зелёных» станций — вдоль Красного моря и в центральной Аравии — означает, что влияние пылевого события зафиксировано как над внутренними районами, так и в прибрежной зоне. Характерно, что над центральной частью снимка станция AERONET находится прямо на границе плотного пылевого облака (видимого на подложке), что исключает ошибочную интерпретацию данных.

К снимку (рис. 3.8) в естественных цветах добавлен слой индекса аэрозоля (AI) прибора OMI (Ozone Monitoring Instrument) на борту спутника Aura (NASA). Индекс аэрозоля OMI чувствителен к поглощающим аэрозолям — прежде всего к минеральной пыли, содержащей оксиды железа, и к дымовым аэрозолям. Цветовая шкала: от белого/бесцветного ($AI \approx 0$) до тёмно-красного ($AI \geq 5,0$).

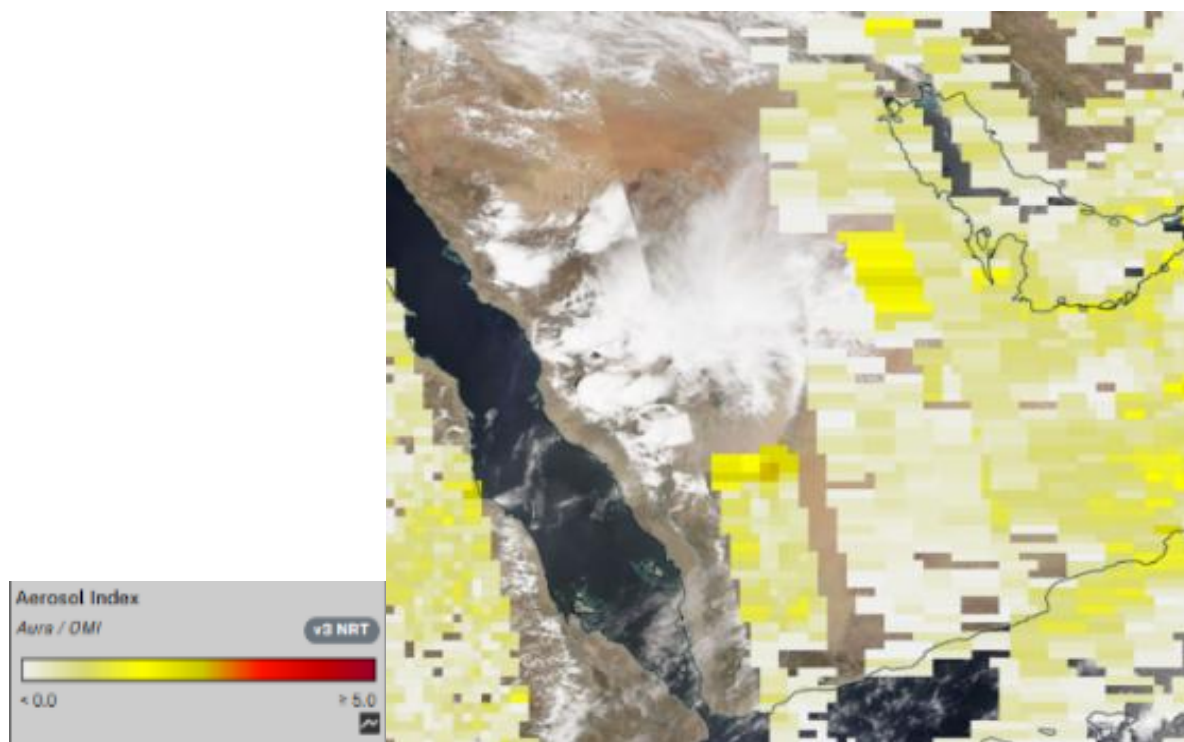


рис 3.8 - Аэрозольный индекс на 29.04.2024 (Aura/OMI)

На снимке желтовато-оранжевые пиксели индекса аэрозоля покрывают обширную территорию к востоку от Красного моря — Неджд, Хафр-эль-Батин и прилегающие районы. Мозаичная (пиксельная) структура слоя обусловлена низким пространственным разрешением OMI ($\sim 13 \times 24$ км), что типично для данного продукта. Значения AI в жёлтой зоне ($\sim 1,0$ – $2,5$) подтверждают присутствие поглощающего аэрозоля, идентифицируемого как минеральная пыль с примесью оксидов железа — типичная для аравийских источников.

Важно отметить, что над зоной плотного пылевого облака (белесовато-серая структура в центре снимка) слой OMI отсутствует или имеет пропуски — это методологическая особенность продукта: при очень высоком AOD прибор теряет чувствительность из-за насыщения сигнала. Таким образом, граница жёлтого поля AI маркирует не фронт пыльной бури, а зону перехода от оптически умеренного к экстремально плотному пылевому покрову, где OMI уже не способен корректно восстановить значения.

Данный слой (рис. 3.9) — UV Aerosol Index (UVAI) прибора OMI в стандартной версии v3 STD — функционально отличается от предыдущего слоя AI. UVAI рассчитывается по ультрафиолетовым каналам (354 и 388 нм) и наиболее чувствителен к поглощающим аэрозолям на больших высотах. Цветовая шкала для данного слоя: 0,5–4,5 (жёлтый → красный → тёмно-красный).

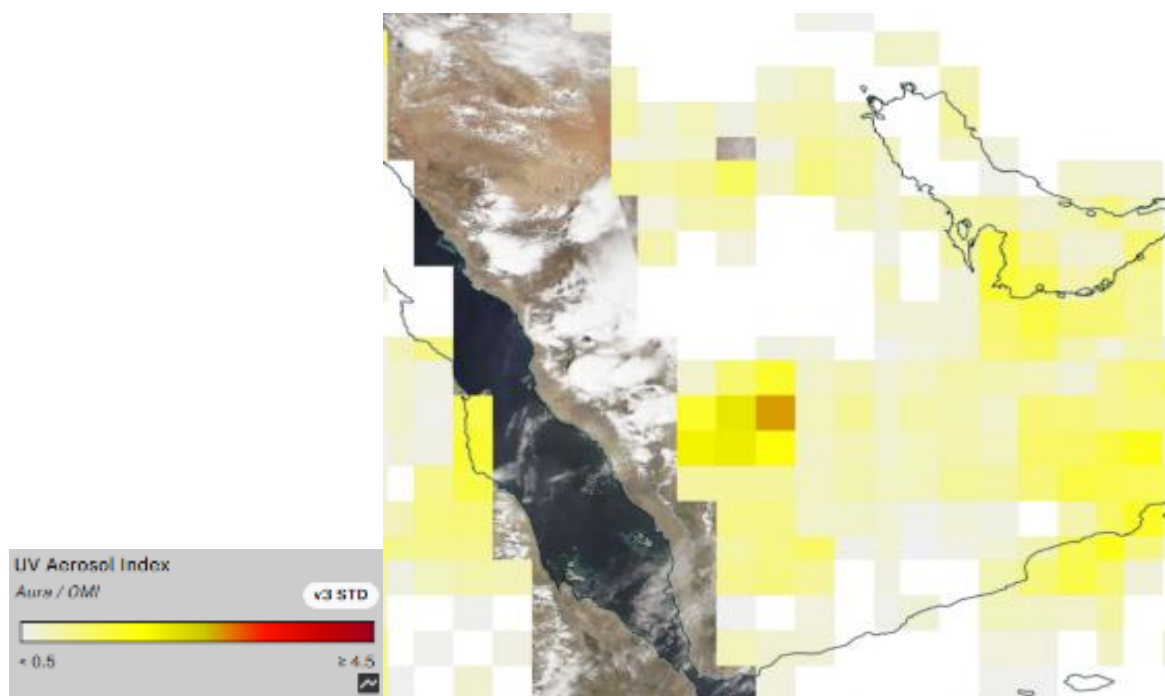


рис 3.9 - Ультрафиолетовый аэрозольный индекс на 29.04.2024 (Aura/OMI)

На снимке наряду с широкой зоной жёлтых значений ($\sim \text{AI } 0,5\text{--}2,0$) выделяется один тёмно-коричневый пиксель ($\sim 20^\circ$ с.ш., 45° в.д.) со значением $\text{UVAI} > 4,0$. Это точечный максимум, расположенный непосредственно к западу-северо-западу от Вадии ад-Давасир. Столь высокие значения UVAI свидетельствуют о присутствии плотного слоя поглощающей пыли на высотах, доступных для ультрафиолетового зондирования. Это означает, что пыль не только распространена в приземном слое, но и поднята в среднюю тропосферу, что характерно для развитых пыльных бурь с активными конвективными потоками.

Пространственное совпадение максимума UVAI с районом Вадии ад-Давасир является ключевым результатом: оно указывает на то, что данный район был не просто охвачен пыльной бурей, но находился в непосредственной близости от одного из центров активного пылеподъёма, где вертикальный перенос частиц достигал наибольшей интенсивности.

К снимку (рис. 3.10) в истинных цветах добавлен слой классификации типа аэрозоля продукта Deep Blue (NOAA-20/VIRS). Данный алгоритм разработан

специально для работы над яркими поверхностями (пустыни, аридные зоны), где стандартный алгоритм Dark Target (MODIS) неприменим. Пространственное разрешение — 10 км. Категории аэрозольного типа, как правило, включают: пыль, дым, морской аэрозоль, смесь, загрязнение.

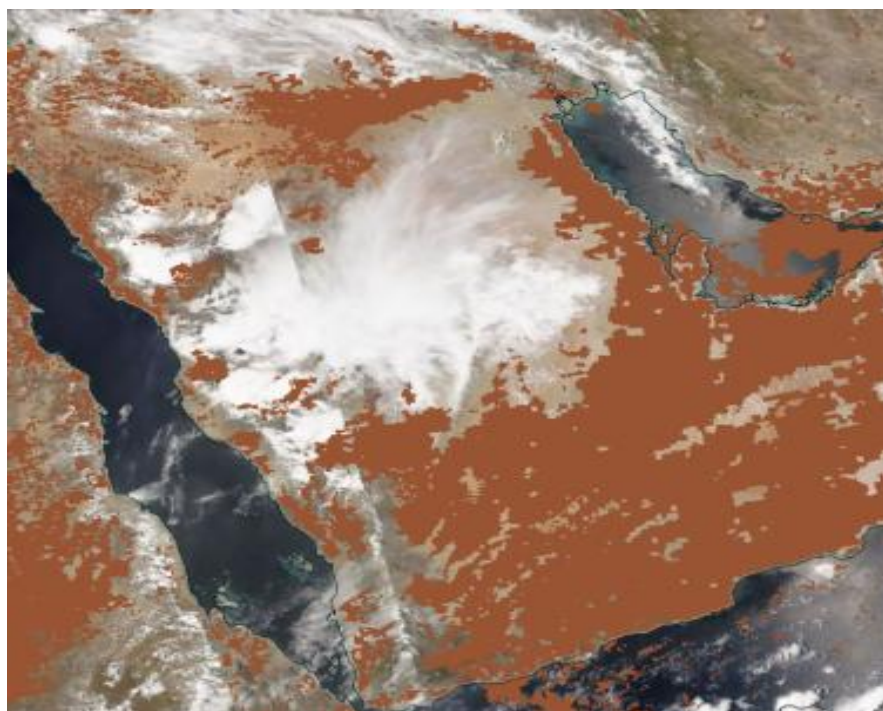


рис 3.10 - Типы аэрозоля (Deer Blue) на 29.04.2024 (NOAA-20/VIIIRS)

Насыщенный терракотово-коричневый цвет покрывает практически весь видимый фрагмент Аравийского полуострова — от побережья Красного моря на западе до Персидского залива на востоке. Данный цвет соответствует категории «пыль» по легенде продукта Deer Blue. Алгоритм машинного распознавания однозначно идентифицирует тип аэрозоля над всем регионом как минеральную пыль.

Примечательно, что коричневая окраска сохраняется даже в зонах видимого пылевого облака (белесовато-серый пик над центральной Аравией), что свидетельствует о устойчивом алгоритмическом распознавании пылевой природы данного образования. Отдельные «просветы» (белые пиксели) в пылевом поле связаны с пропусками данных или зонами облачного

перекрытия. В прибрежных районах (Красное море, Арабский залив) классификация также однозначно указывает на пыль, что подтверждает региональный охват события.

К снимку VIIRS (рис. 3.11) в истинных цветах добавлен слой «Dust Score (L2, Day)» прибора AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) спутника Aqua. AIRS работает в инфракрасном диапазоне и позволяет обнаруживать минеральную пыль в атмосферном столбе на основе теплового излучения. Шкала Пылевой индекс: 400–500+ К, где значения > 450 –460 К соответствуют значительным концентрациям пыли.

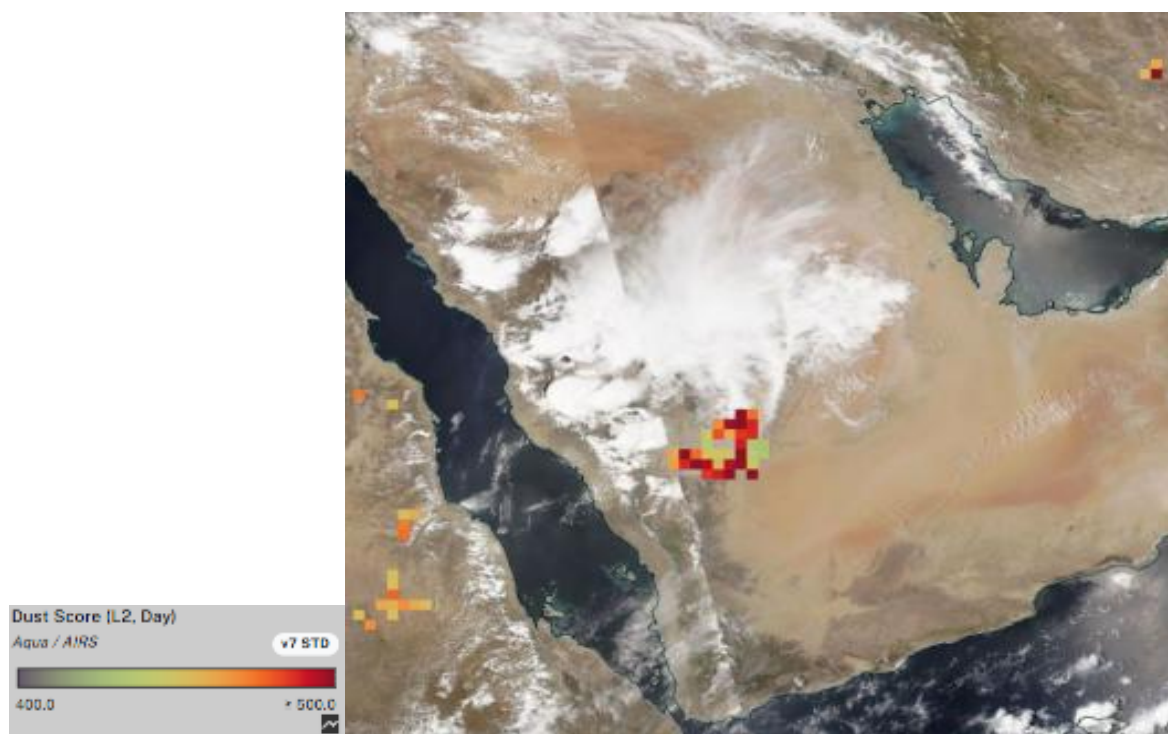


рис 3.11 - Индекс Dust Score Day на 29.04.2024 (Aqua/AIRS)

На слое Пылевой индексе отчётливо выделяются несколько ячеек с максимальными значениями (тёмно-красные и насыщенно-красные пиксели): над внутренними районами центральной Аравии — непосредственно в районе Вадии ад-Давасир. Последнее свидетельствует о распространении пыли в южном направлении.

Сопоставление зон максимального Пылевой индекс с морфологией пылевого облака на подложке в истинных цветах показывает, что ядра максимальных значений расположены не в области наиболее плотного (белого) облака, а на его южном и юго-восточном фланге. Это типичная картина: при инфракрасном зондировании сигнал пыли наиболее силён там, где она расположена в относительно тонком слое над тёплой поверхностью, а не там, где её концентрация столь высока, что подстилающая поверхность полностью экранирована.

Данный слой (рис. 3.12) — «Dust Score (L2, Night)» того же прибора AIRS — получен в ночное время суток при пролёте Aqua, то есть примерно через 6–8 часов после дневного снимка. Сравнение дневного и ночного Пылевой индексе позволяет оценить временную эволюцию пылевого события.

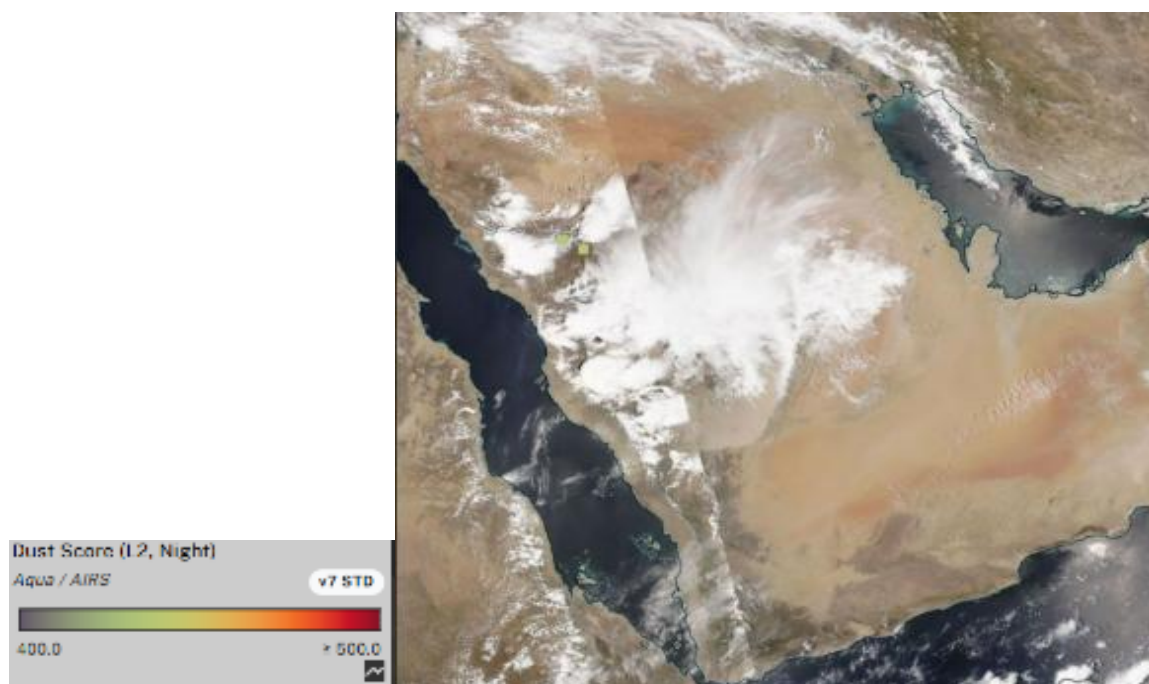


рис 3.12 - Индекс Dust Score Night на 29.04.2024 (Aqua/AIRS)

На снимке ночного Пылевой индексе представлено крайне мало пикселей с ненулевыми значениями над западной Аравией, к северу от Джидды, с очень низкими значениями (400–410 K). Это резко контрастирует с дневным

снимком, где фиксировались многочисленные ядра высоких значений Пылевой индексе.

Столь значительное уменьшение числа пикселей объясняется несколькими факторами. Во-первых, ночью снижается конвективная активность и приземные ветры ослабевают, что приводит к осаждению крупных частиц. Во-вторых, при ночном термическом зондировании AIRS сигнал пыли ослабляется вследствие уменьшения радиационного контраста между холодной поверхностью и пылевым слоем. В-третьих, значительная часть пылевого облака к вечеру могла сместиться за пределы охвата данного пролёта. Тем не менее присутствие ненулевых значений над западной Аравией свидетельствует о том, что пылевой слой частично сохранялся в атмосфере и в ночные часы.

Совокупность всех проанализированных материалов однозначно свидетельствует о том, что 29 апреля 2024 г. в районе Вади ад-Давасир наблюдалась интенсивная пыльная буря, обусловленная устойчивым шамальным потоком в условиях барической ложбины над центральной Аравией. Запас пыли (DCM) по MERRA-2 превышал 300 мг/м^2 ; оптическая толщина аэрозоля по AERONET достигала 3–5 единиц; UVAI зафиксировал максимальные значения непосредственно над котловиной. Тип аэрозоля идентифицирован всеми алгоритмами (Deep Blue, Dust Score, параметр Ангстрёма) как минеральная пыль крупной фракции. Данное событие сопровождалось видимостью, снизившейся до экстремально малых значений, что подтверждается кодом METAR OEWD 291000Z 36028KT 0100 +DS — скорость ветра 28 узлов, видимость 100 метров, буря (+DS).

3.2 Пыльные бури в Кувейте 04.05.2025

3.2.1 Анализ синоптической ситуации

Снимок (рис. 3.13) представляет собой синоптическую приземную карту, охватывающую обширную географическую область, включающую Аравийский полуостров, Персидский залив, а также части Северной Африки и прилегающих территорий. Карта содержит изобары, закодированные данные наблюдений наземных метеостанций по международному стандарту SYNOP. Распространение пыли в регионе определяется по низким значениям горизонтальной видимости, зафиксированным на ряде метеостанций, расположенных в центральной и северной частях Аравийского полуострова. Коды текущей погоды, записанные в данных станций, указывают на наличие пыльной бури или устойчивой запылённости воздуха в ряде пунктов, особенно в зоне низкого атмосферного давления.

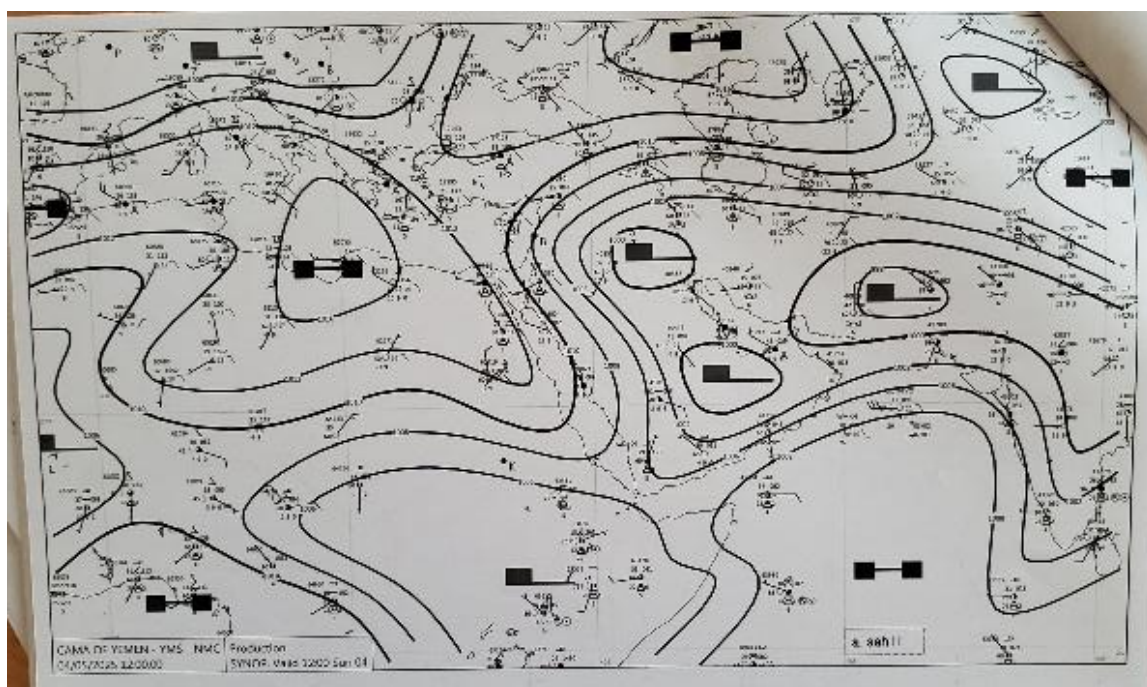


рис 3.13 - Приземная синоптическая карта на 04.05.2025

Синоптическая карта непосредственно не отображает визуальные воздействия на инфраструктуру или растительный покров, однако

зафиксированные значения горизонтальной видимости косвенно отражают ухудшение качества воздуха у поверхности земли и снижение дальности видимости, что оказывает прямое воздействие на наземный и воздушный транспорт.

Возможные экологические и природные факторы: над северной частью Персидского залива и югом Ирака прослеживается приземный циклон, вокруг которого изобары расположены с заметной плотностью, тогда как над центральной частью Аравийского полуострова господствует область низкого давления. Этот барический контраст формирует значительные градиенты давления, обуславливающие усиление северо-западных ветров («шамаль»), известных своей способностью поднимать пыль и песок с открытых пустынных поверхностей.

Синоптическая карта по своей природе не содержит прямых свидетельств опустынивания, однако общий характер распределения атмосферного давления в сочетании с зафиксированными низкими значениями относительной влажности формирует образ хрупкой засушливой среды, способной реагировать на любое ветровое возмущение возникновением масштабных пыльных волн.

Карта (рис. 3.14) отображает распределение скорости ветра (в узлах) на уровне 850 гПа над Ближним Востоком, сопровождаемое флюгарками ветра и линиями геопотенциала (в декаметрах), нанесёнными чёрным цветом. Скорость ветра варьируется от 35 до 70 узлов согласно цветовой шкале.

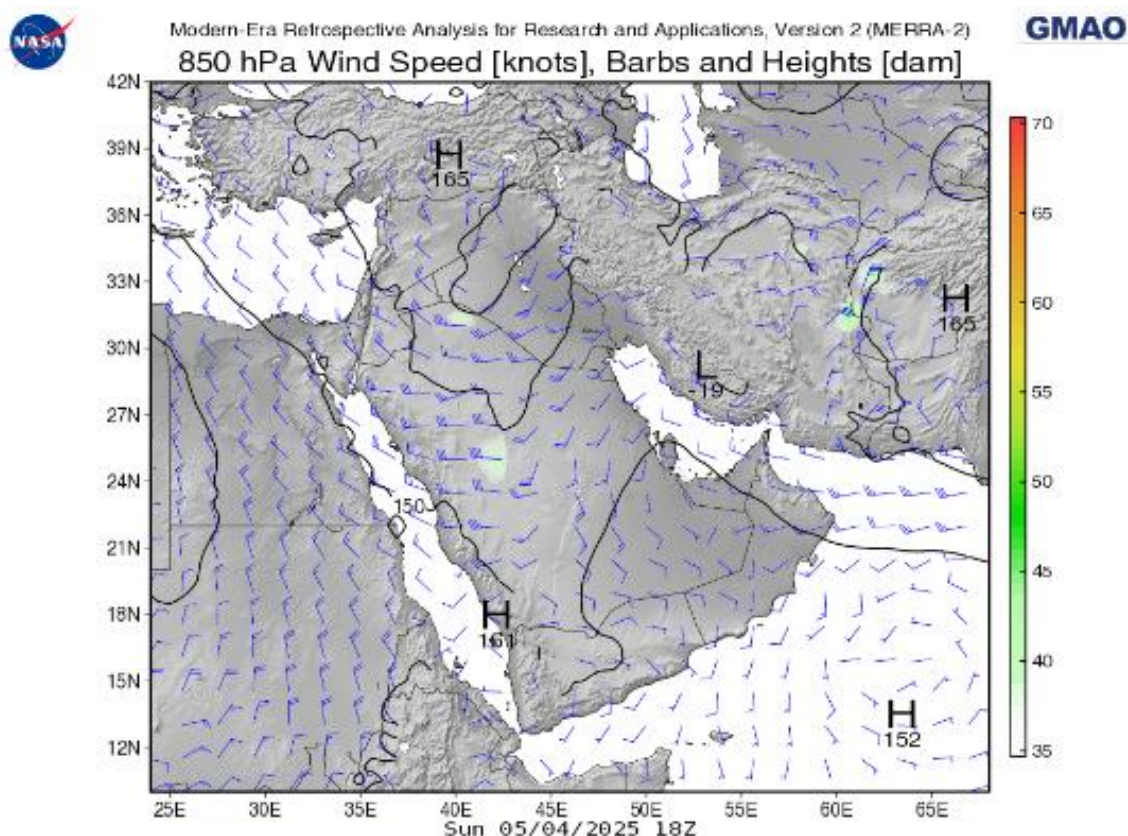


рис 3.14 - Поле Ветра на 850 гПа на 04.05.2025 (Merra 2)

На карте отчётливо выделяются центры высокого давления (H) над Турцией на севере, над Индостаном и Пакистаном на востоке и над Аденским заливом на юге, тогда как над югом Ирана и Аравийским заливом на уровне 850 гПа располагается ложбина низкого давления (L). Такое распределение формирует ускоренный воздушный поток с северо-запада и севера над зоной Персидского залива и Аравийского полуострова.

Связь атмосферной динамики с распространением пыли: Флюгарки ветра над Аравийским полуостровом расположены с заметной плотностью и отражают скорости 15–25 узлов на уровне 850 гПа — значения, достаточные для подъёма мелкодисперсных частиц и их переноса на значительные расстояния. Взаимосвязь этой динамики с пылевыми массами, показанными на втором снимке, подтверждает гипотезу о том, что атмосферный перенос является главным движущим фактором данного пылевого события.

Направление ветра на данном уровне в сторону Кувейта и северной части Залива свидетельствует о том, что регион находился на пути воздушного потока, насыщенного пылью, поступающей из засушливых внутренних районов Саудовской Аравии и Ирака.

3.2.2 Анализ данных реанализа Merra 2

Карта (рис. 3.15) отображает распределение вертикального столба пылевой массы в единицах $\text{мг}/\text{м}^2$, дополненное траекториями аэрозольного переноса. Охватывает регион Ближнего Востока основана на данных модели MERRA-2, разработанной Глобальным центром моделирования атмосферы и ассимиляции данных (GMAO) НАСА.

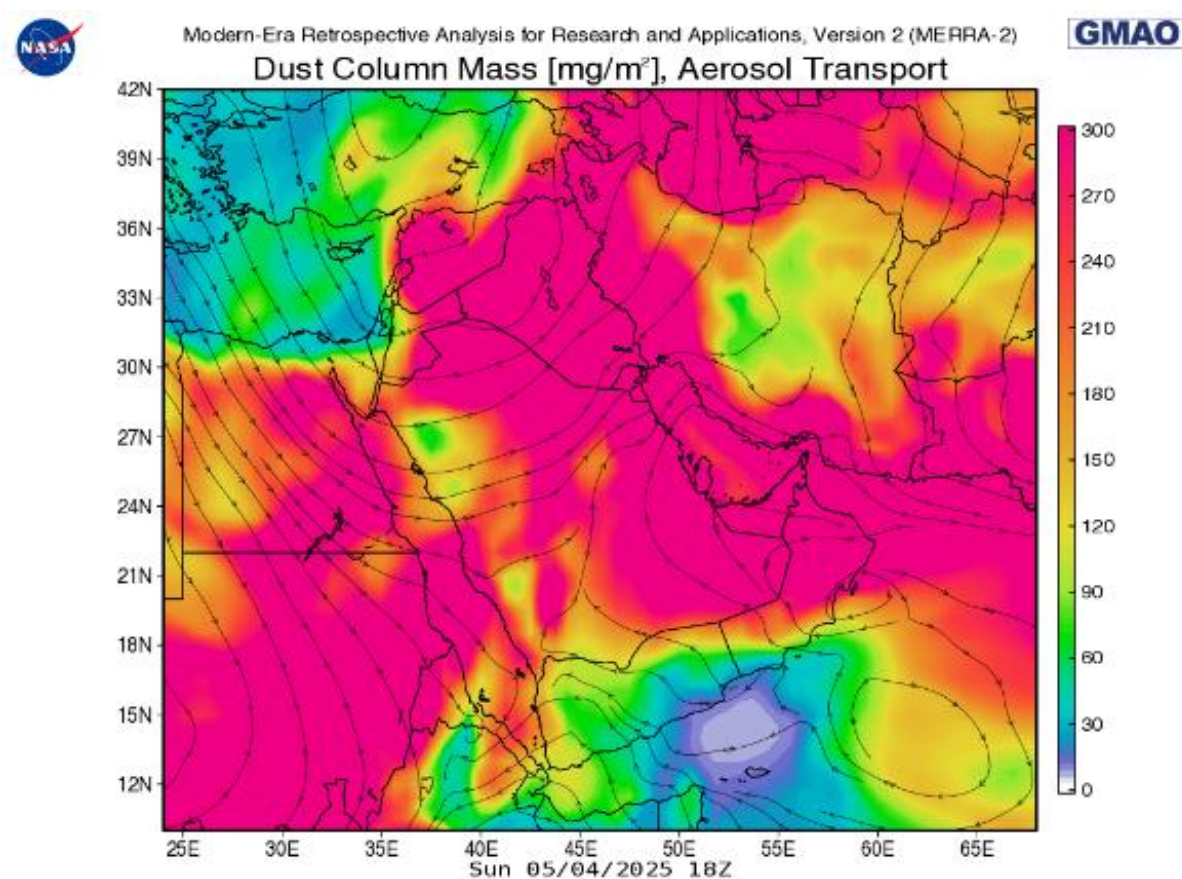


рис 3. 15 - Масса пыли в столбе атмосферы на 04.05.2025

Признаки пыли и аэрозольного переноса: Карта выявляет чрезвычайно высокие концентрации пыли (превышающие 300 мг/м^2), сосредоточенные над центральной и северной частями Аравийского полуострова в розово-пурпурной цветовой гамме, соответствующей максимальным значениям шкалы. Эта плотная пылевая масса распространяется на южное побережье Персидского залива, Кувейт и юг Ирака, что свидетельствует о региональном пылевом событии широкого охвата.

Траектории аэрозольного переноса: Стрелки траекторий переноса аэрозолей показывают общее движение в юго-восточном направлении вдоль Аравийского полуострова с заметным отклонением в сторону Оманского залива и Аравийского моря. Данная картина соответствует сезонной циркуляции «шамаль», характерной для начала летнего сезона в регионе Персидского залива.

Концентрации вертикального столба пыли, превышающие 200 мг/м^2 , оказывают значительное воздействие на качество приземного воздуха и интенсивность солнечного излучения, достигающего поверхности земли. При таких уровнях горизонтальная видимость резко снижается, а сельскохозяйственная деятельность нарушается вследствие оседания пылевых слоёв на листьях и сельскохозяйственных культурах.

Масштаб пылевой массы, генерируемой с территории Аравийского полуострова, указывает на активные источники эмиссии, связанные с открытыми пустынями с недостаточным растительным покровом, что отражает экологическую хрупкость среды, усугублённую усилением ветровой активности в данный период.

3.2.3 Анализ пылевых шлейфа

Снимок (рис. 3.16) представляет собой спутниковое изображение в естественных цветах, охватывающее Аравийский полуостров, значительную часть стран Персидского залива, Оманский залив, Красное море и Аравийское море. Природный рельеф прослеживается достаточно чётко, а в тональном решении преобладает коричневато-песчаный цвет, характерный для большей части сцены.

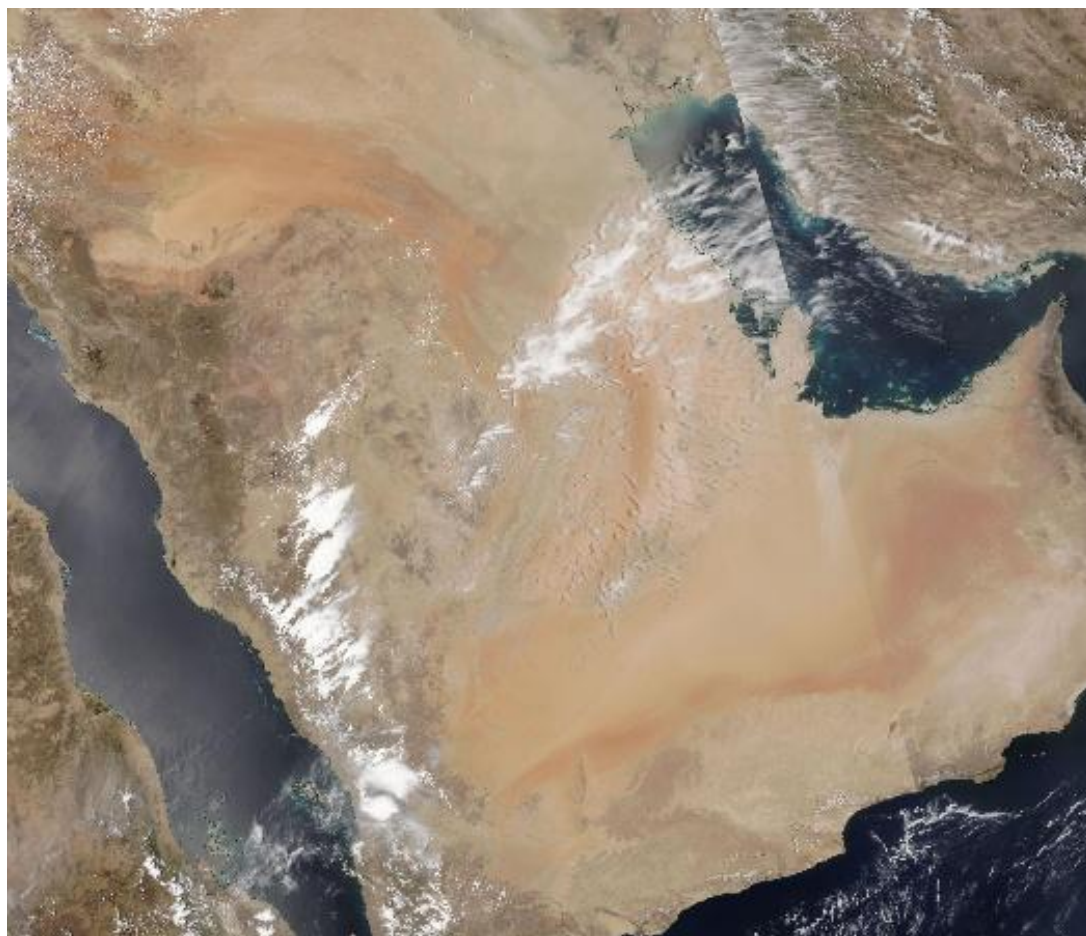


рис 3.16 - Спутниковая снимка на 04.05.2025 (NOAA-21)

Пылевой покров беж-светло-коричневого оттенка занимает обширные пространства центральной и восточной частей Аравийского полуострова. Явление пыли особенно выражено в районах, протянувшихся от центральной Саудовской Аравии до Кувейта и юга Ирака, где поверхность покрыта

широкой пыли, скрывающей черты земного покрова и снижающей прозрачность нижних слоёв атмосферы.

На западных нагорьях Аравийского полуострова (Асир, Джазан, Йемен) видны белесые пятна, представляющие собой облачность, связанную с более высокой влажностью в этих районах. Открытые же внутренние территории лишены сколько-нибудь значимого растительного покрова, что указывает на оголённые уязвимые земли, предрасположенные к пылеобразованию.

Огромная протяжённость однородной коричневатой-песчаной поверхности отражает практически полное отсутствие растительного покрова — закономерность, типичная для зон прогрессирующего опустынивания. Активные северо-западные ветры способствуют дефляции песчаных территорий и переносу продуктов разрушения в направлении густонаселённых прибрежных районов и акватории Залива.

На многоспектральном снимке в схеме Dust RGB (рис. 3.17) охвачены Кувейт, южный Ирак и восточная Саудовская Аравия. Цветовая легенда данной схемы: красно-коричневые тона — конвективная облачность (Cb), розово-пурпурные — минеральная пыль, голубой и синий — чистая атмосфера или поверхность без аэрозоля.

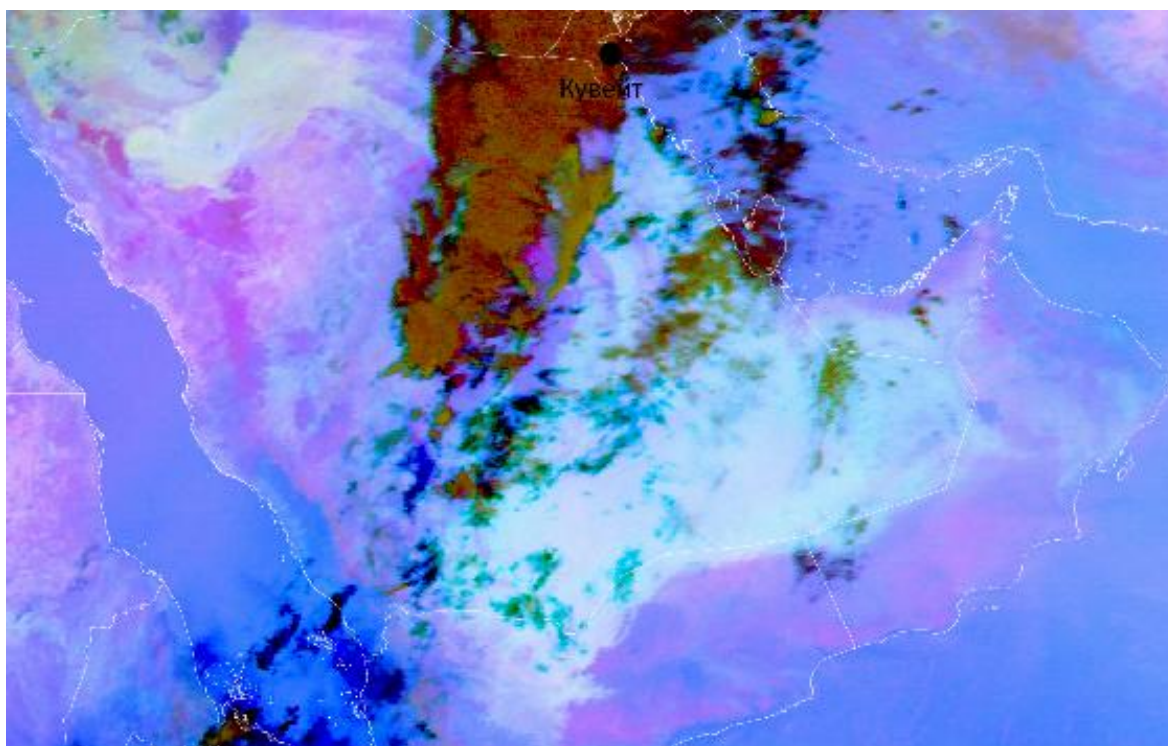


рис 3.17 - Спутниковый снимок Meteosat/MSG, канал аэрозоля пыли на 04.05.2025

Кувейт (чёрная точка) находится на границе между красно-коричневым массивом конвективной облачности и розово-пурпурной зоной пылевого аэрозоля. Красно-коричневая полоса, вытянутая с севера на юг через центр снимка, соответствует системе кучево-дождевых облаков с активными апдрафтами. Именно эти конвективные ячейки обеспечивали вертикальный подъём пыли в средние слои тропосферы.

Розово-пурпурный фон, занимающий западную и центральную части сцены, — сигнатура диффузного пылевого аэрозоля умеренной оптической толщины, распространяющегося из Ирака и Сирии в южном направлении. Зеленоватые переходные оттенки вдоль контакта двух доменов указывают на смешанный тип аэрозоля: пыль, частично перекрытая низкой облачностью.

Снимок (рис. 3.18) демонстрирует интерфейс NASA Worldview с активированным слоем аэрозольной оптической глубины (AOD) на длине волны 500 нм по данным сети AERONET. Цветовая шкала варьируется от жёлтого (низкие значения) до тёмно-красного (высокие значения, до 5,0). В

качестве подложки использован снимок в естественных цветах с исправленной отражательной способностью от спутника NOAA-21/VIRS.

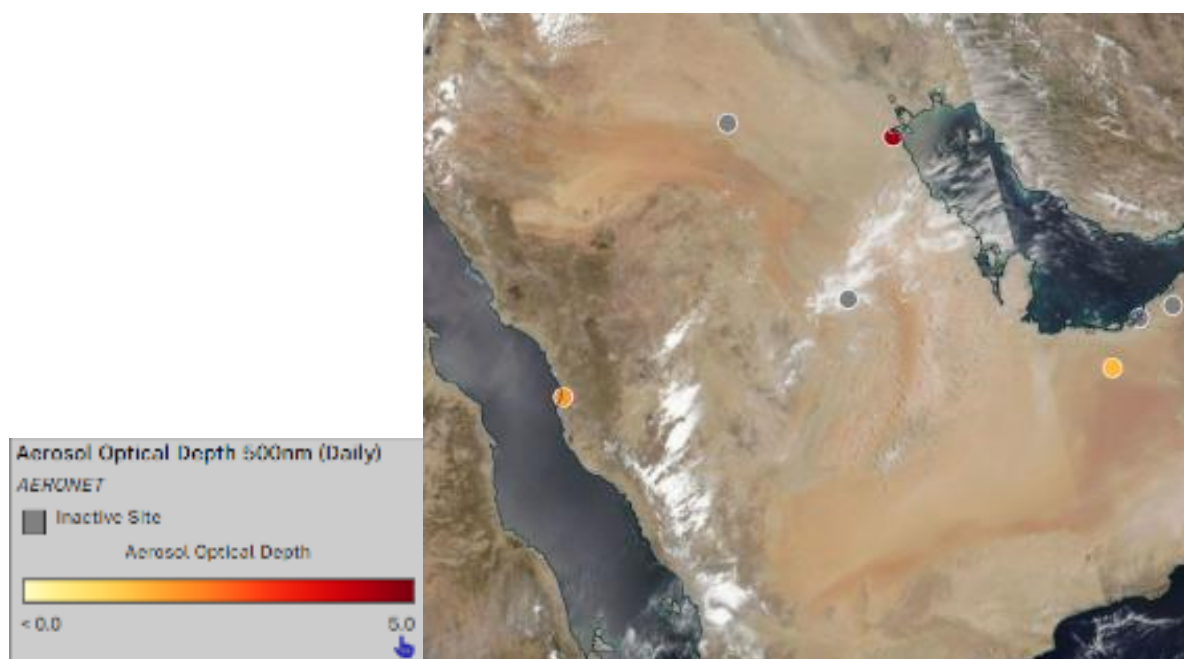


рис 3.18 - Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 500 нм на 04.05.2025 (AERONET)

Красная точка в северной части Аравийского залива (в Кувейте) указывает на очень высокое значение аэрозольной оптической глубины, измеренное наземной станцией AERONET, что подтверждает результаты численного моделирования независимыми наземными измерениями. Серые и белые метки на Аравийском полуострове соответствуют неактивным станциям сети.

Аэрозольная оптическая глубина характеризует степень поглощения и рассеяния солнечного излучения в столбе атмосферы. Значения AOD, превышающие 2,0, оказывают заметное влияние на температуру у поверхности, состояние растительности и качество воздуха. Зафиксированное в районе Кувейта значение приближается к максимальным показателям для данного региона.

На фоне подложки в естественных цветах наглядно проявляется огромный пылевой шлейф, накрывающий центральную и восточную части Аравийского

полуострова, что объясняет высокое оптическое поглощение, зарегистрированное наземными приборами AERONET в этом районе.

Отображается слой (рис. 3.19) показателя Ангстрема, вычисленного по длинам волн 440 и 870 нм по данным AERONET — количественный индикатор, позволяющий различать типы аэрозольных частиц. Низкие значения (близкие к нулю, зелёно-жёлтые тона) указывают на крупные частицы, характерные для пустынной пыли; высокие значения (фиолетово-синие тона) отражают мелкодисперсные частицы — дым.

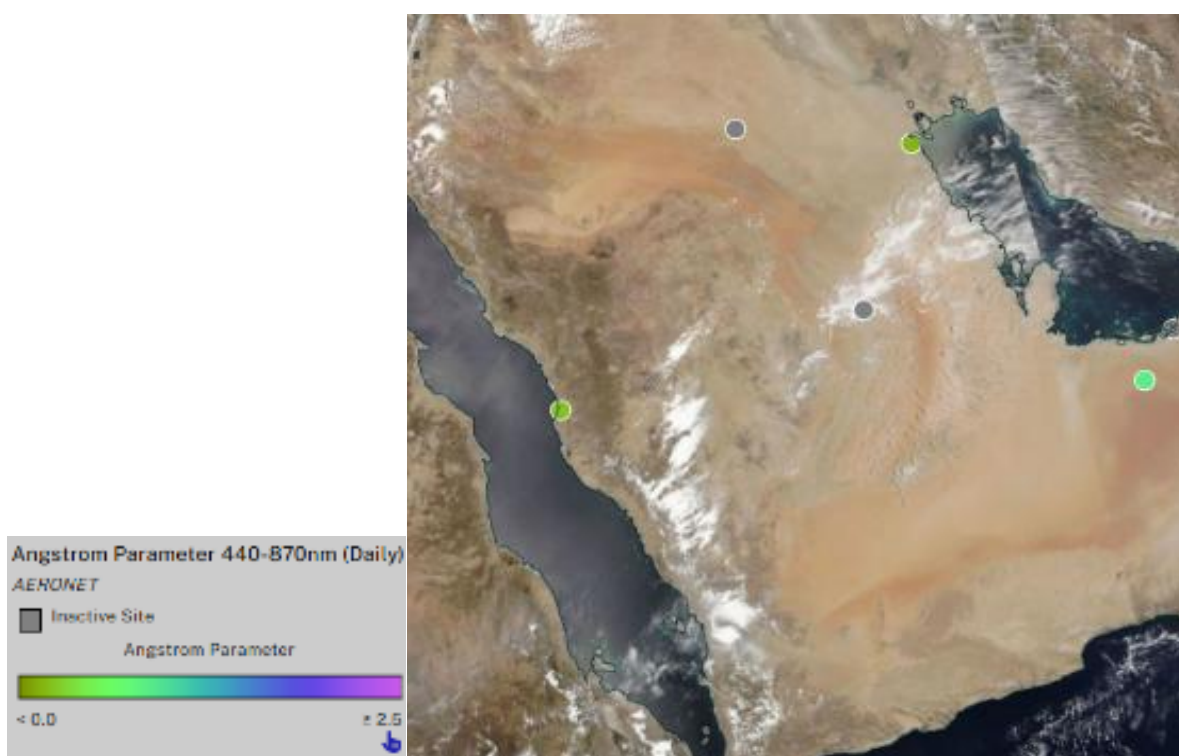


рис 3.19 - Параметр в ангстремах на 04.05.2025 (440–870 нм) (AERONET)

Наблюдательные станции в районе Персидского залива (вблизи Кувейта, Бахрейна и Омана) показывают значения показателя Ангстрема в светло-зелёном диапазоне, что подтверждает преобладание крупнодисперсной пустынной пыли в качестве ведущего вида аэрозоля в регионе.

Данный результат имеет важное научное значение, поскольку позволяет идентифицировать природу аэрозоля и классифицировать его как пыль

естественного ветрового происхождения, а не как промышленное загрязнение. Это указывает на то, что основным источником является пыль пустынь Аравийского полуострова и Ирака, а не техногенная деятельность. Такое разграничение необходимо для оценки последствий для здоровья населения и выработки соответствующих мер реагирования.

Наличие значительного количества крупнодисперсных частиц с низким показателем Ангстрема свидетельствует об активных и нестабильных источниках пылеобразования, что отражает критическое экологическое состояние — непрекращающуюся ветровую эрозию поверхности в окружающих засушливых районах.

Отображается слой индекса аэрозолей (рис. 3.20) со средним пространственным разрешением по данным спектрометра OMI, установленного на спутнике Aura. Цветовая шкала варьируется от белого (0,5) до тёмно-красного ($\geq 4,5$). Данные представлены в режиме почти реального времени (Near Real Time — NRT).

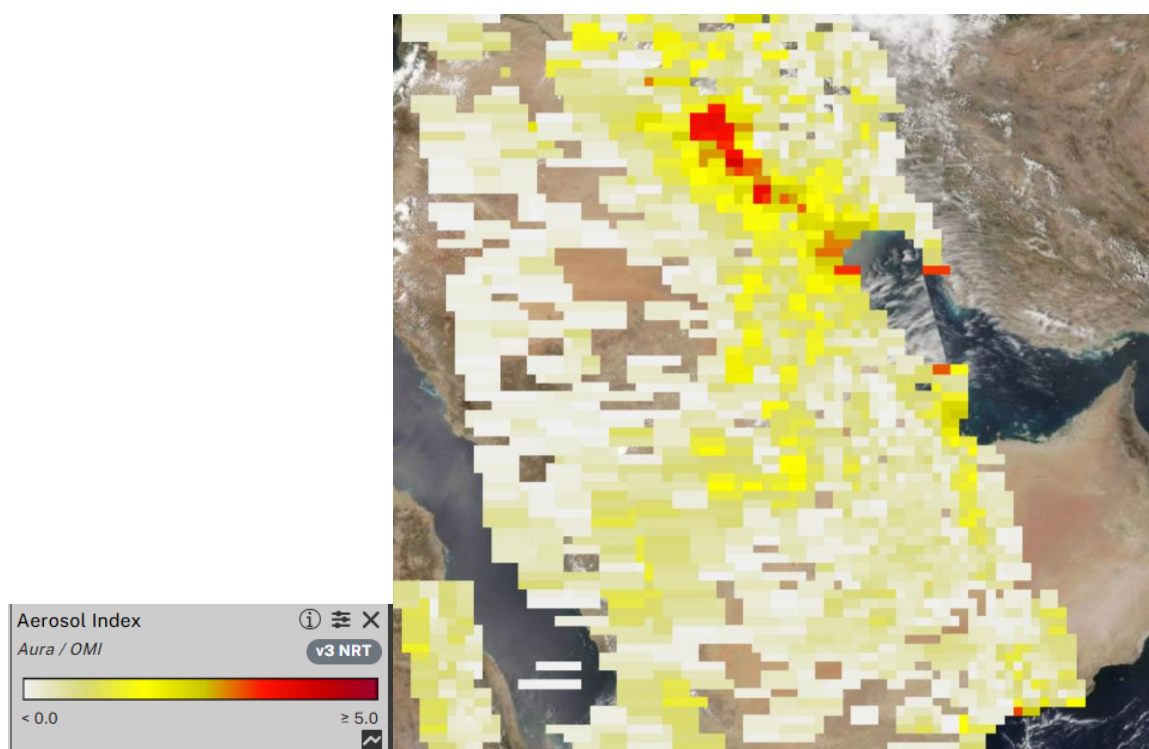


рис 3.20 - Аэрозольный индекс на 04.05.2025 (Aura/OMI)

Жёлтые и оранжевые тона преобладают на большей части видимой территории, что соответствует значениям индекса аэрозолей в диапазоне 1–3. Более высокие значения (тёмно-красные тона) выделяются над северной частью Арабского залива, что совпадает с районами, определёнными на предыдущих снимках как очаг пылевого события.

Повышение значений над Кувейтом и югом Ирака отражает значительную концентрацию пыли в атмосферном слое от поверхности земли до средней тропосферы.

В густонаселённых городских районах, таких как Кувейт, подобный уровень аэрозольной нагрузки оказывает прямое воздействие на дорожную сеть, аэропорты и системы солнечной энергетики: пылевые частицы оседают на панелях солнечных батарей, существенно снижая их эффективность.

Отображается слой ультрафиолетового индекса аэрозолей (рис. 3.21) из стандартного продукта (v3 STD) прибора OMI/Aura с акцентом на районе Персидского залива, Кувейта и восточной части Аравийского полуострова. Цветовая шкала начинается от белого и переходит к красному.

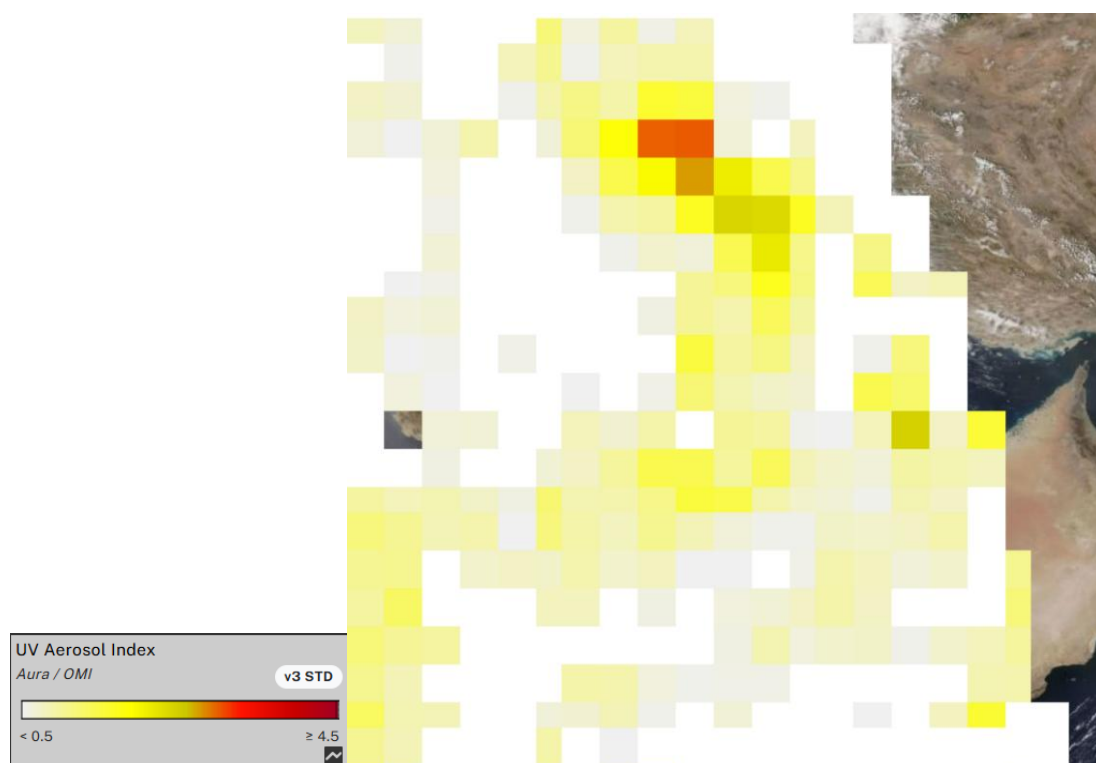


рис 3.21 - Ультрафиолетовый аэрозольный индекс на 04.05.2025 (Aura/OMI)

Наибольшие значения индекса (жёлто-оранжевые тона) сосредоточены в северо-восточной части снимка — в районе Кувейта, юга Ирака и Восточной провинции Саудовской Аравии. На юге Аравийского полуострова значения относительно ниже.

Интерпретация высоких значений в северном секторе: Повышение UV-индекса аэрозолей в районе Кувейта подтверждает наличие высокой аэрозольной нагрузки, обладающей способностью поглощать ультрафиолетовое излучение. Это укрепляет вывод о том, что Кувейт находился в центре зоны пылевого воздействия, а не на её периферии в ходе данного события.

Отображается слой классификации аэрозолей по алгоритму Deep Blue (рис. 3.22) со спутника NOAA-20/VIIRS — алгоритма, специально разработанного для получения характеристик аэрозолей над светлыми сухими поверхностями, такими как пустыни. Каждому пикселю присваивается тип аэрозоля, обозначаемый соответствующим цветом.

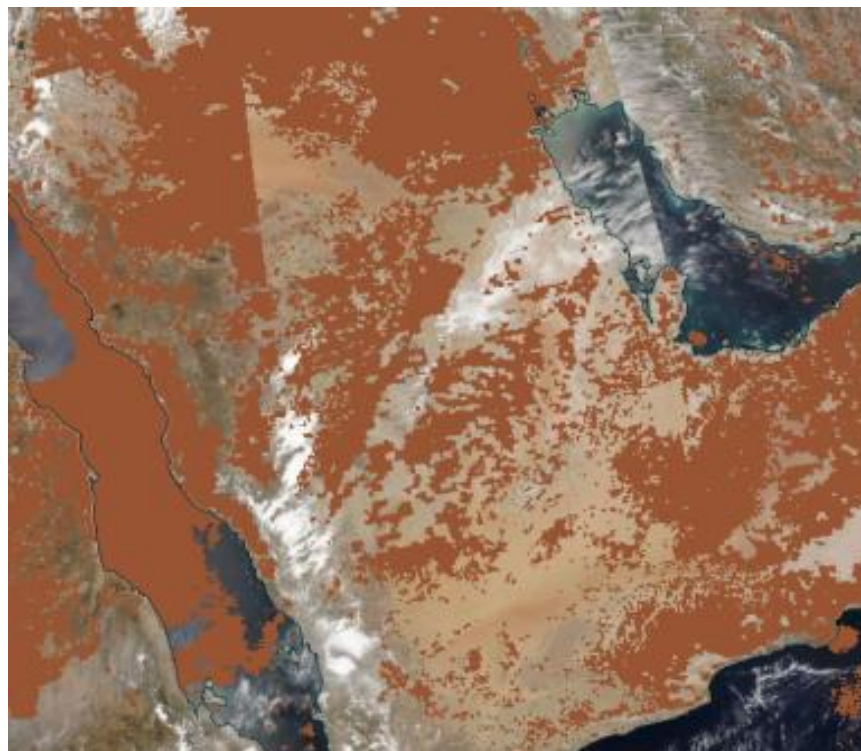


рис 3.22 - Типы аэрозоля на 04.05.2025 (Deer Blue) (NOAA-20/VIIRS)

Интерпретация классификации аэрозолей: Коричнево-серый тёмный цвет (пыль — Dust) занимает большую часть карты, в особенности над центральной и восточной частями Аравийского полуострова и Кувейтом, что свидетельствует о широком преобладании пустынной пыли в аэрозольном составе воздушной массы региона. Вдоль побережий наблюдаются отдельные пятна иных цветовых тонов, вероятно указывающие на смешанный аэрозоль.

Алгоритм Deer Blue разработан для преодоления значительных трудностей при восстановлении характеристик аэрозолей над пустынными поверхностями и обеспечивает минимальную погрешность отражательной способности на подобных подстилающих поверхностях. Тем самым полученные результаты, подтверждающие господство пустынной пыли, признаются одними из наиболее достоверных свидетельств в рамках данного исследования.

Обширный географический охват зон пустынной пыли, классифицированных алгоритмом Deep Blue, формирует предметную карту экологически уязвимых территорий. Аравийский полуостров и юг Ирака представляют собой основной пояс эмиссии пыли вследствие отсутствия растительного покрова и высокой восприимчивости почв к ветровой эрозии.

Отображается слой дневного балла пылевого события (Dust Score L2 Day) по данным ИК-спектрометра AIRS (рис. 3.23), установленного на спутнике Aqua. Прибор обеспечивает детектирование пыли на более высоких уровнях атмосферы при среднем пространственном разрешении. Шкала значений варьируется от 400 (слабое) до 500+ (очень высокое).

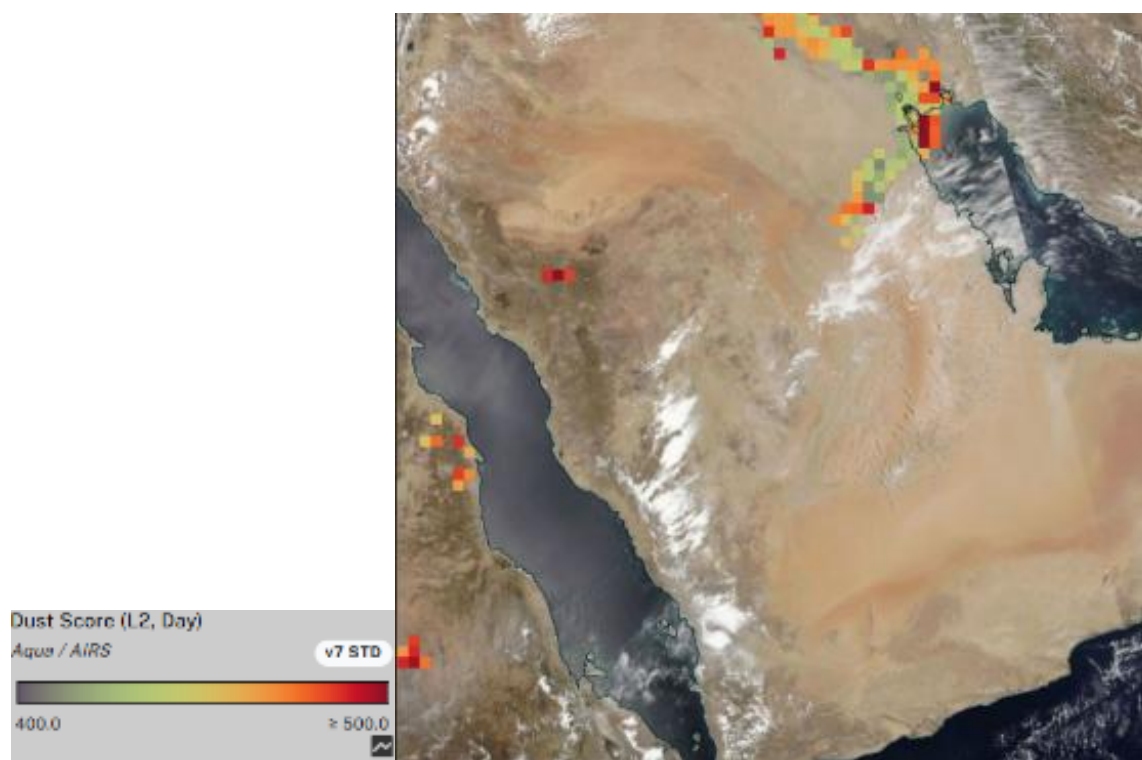


рис 3.23 - Индекс Dust Score Day на 04.05.2025 (Aqua/AIRS)

Наибольшие дневные значения балла пыли зафиксированы над Кувейтом, югом Ирака и Восточной провинцией Саудовской Аравии (красно-оранжевые пиксели), при умеренных значениях, распространяющихся к югу вдоль

центрального Залива. Над юго-западной частью Аравийского полуострова присутствие пыли значительно слабее по сравнению с севером.

Прибор AIRS фиксирует пыль на более высоких атмосферных уровнях по сравнению с приборами видимого диапазона, что позволяет изучать трёхмерную структуру пылевого события. Высокие значения дневного балла пыли над Кувейтом подтверждают, что пыль не была ограничена приземным слоем, а охватывала более высокие атмосферные уровни.

Проникновение пыли в более высокие атмосферные слои продлевает продолжительность пылевого события, поскольку частицы, поднявшиеся на высоту, продолжают поступать в район даже после ослабления приземного ветра, что затрудняет воздушное движение и снижает точность данных наземных оптических приборов.

Отображается слой ночного балла пылевого события (Dust Score L2 Night) со спутника Aqua/AIRS на фоне снимка в естественных цветах (рис. 3.24) с того же спутника. Снимок также содержит отдельные точки геопозиционных данных над северной частью Персидского залива и югом Ирана.

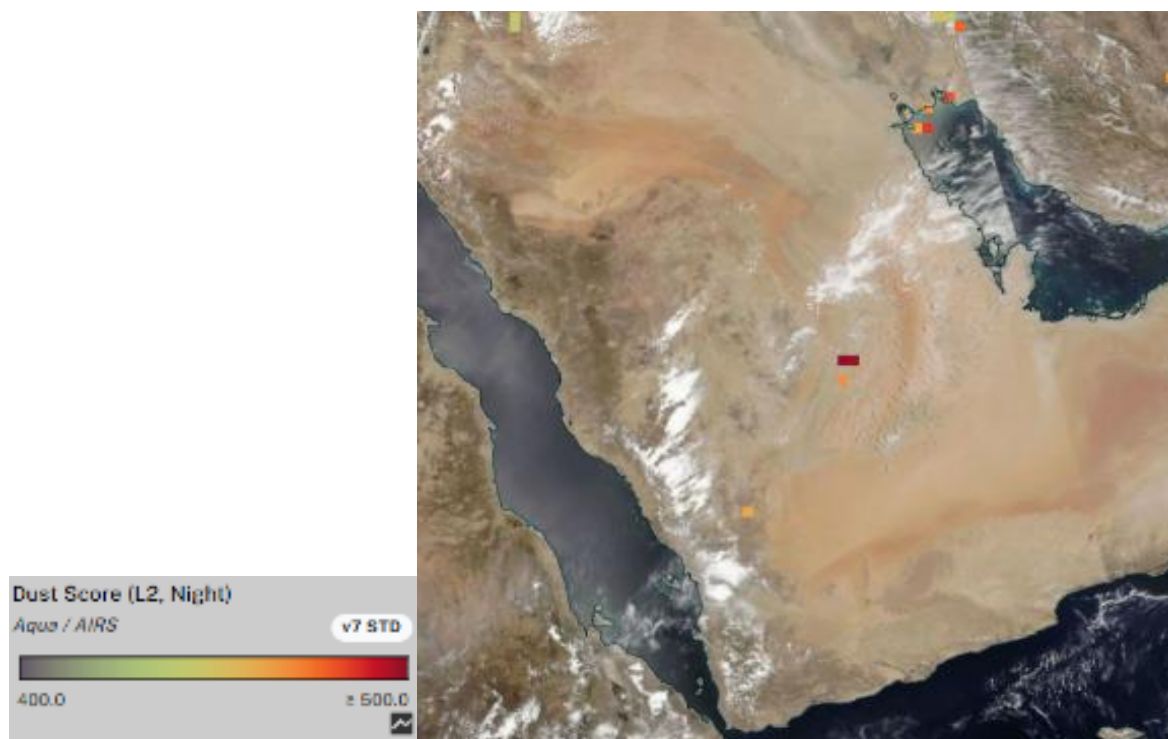


рис 3.24 - Индекс Dust Score Night на 04.05.2025 (Aqua/AIRS)

Ночные измерения, как правило, дают несколько более низкие значения по сравнению с дневными — закономерность, прослеживаемая в исследованиях пустынной пыли и объясняемая частично ослаблением приземной ветровой активности в ночное время и уменьшением интенсивности конвективного подъёма. Тем не менее пылевые сигналы над Кувейтом и Восточной провинцией Саудовской Аравии на ночном снимке свидетельствуют о продолжении пылевого события в ночные часы.

Наличие высоких значений балла пыли в ночных измерениях указывает на пылевую массу, сосредоточенную на атмосферных высотах, которые позволили ей просуществовать в течение ночи без заметного осаждения. Это позволяет предполагать, что пыль находилась в фазе организованного переноса в условиях ночного атмосферного подинверсионного слоя.

Данные METAR OKKK за 20:00 UTC (METAR OKKK 042000Z 31029KT 0300 R15R1100VP1500U R33L0800V1400U R15L0900VP1500U R33R0800V1400U TSDS FEW030CB BKN080 3215 Q1005 REDS NOSIG=) количественно подтверждают спутниковую картину. Ветер 310°/29 уз. — классический шамаль на верхней границе эксплуатационных ограничений. Преобладающая видимость 300 м при RVR на ВПП 800–1100 м соответствует полной потере видимости и подтверждает плотность пылевого аэрозоля, зафиксированного розово-пурпурной сигнатурой. Код TSDS (гроза + пыльная буря) согласуется с красно-коричневыми структурами Сб на снимке: конвективные апдрафты интенсифицировали подъём частиц, что отражено одновременно в спектральном сигнале и в наземном наблюдении. Облачность FEW030CB + BKN080, температура 32°C, точка росы 15°C ($RH \approx 34\%$), давление 1005 гПа — жаркая сухая атмосфера, благоприятная для дальнейшего распространения пыли. Код REDS фиксирует недавнюю активность бури.

3.3 Анализ ветрового режима при пыльных явлениях на Аравийском полуострове

3.3.1 Преобладающие направления ветра и их повторяемость

Анализ розы ветров (рис 3.25), построенной по данным 30 случаев пыльных явлений на Аравийском полуострове, обнаруживает ярко выраженную анизотропию ветрового режима. Лепесток северного направления является доминирующим и достигает отметки 43,3%, что более чем вдвое превосходит частоту любого другого румба. Это означает, что почти в половине всех зарегистрированных случаев пыльные явления формировались при ветре, поступавшем с севера.

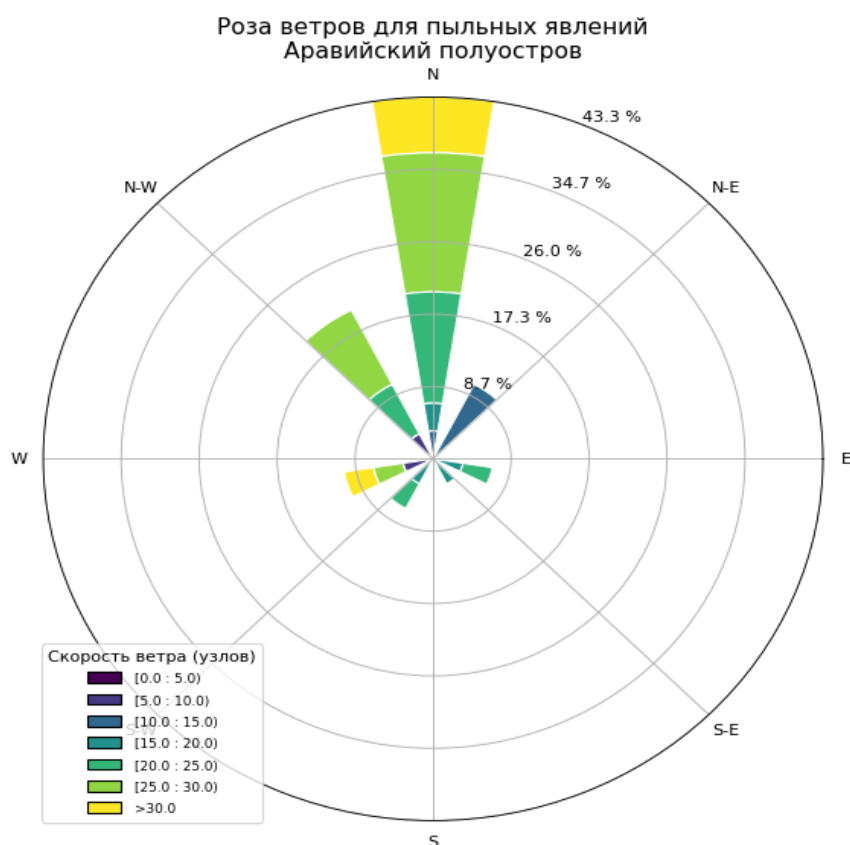


рис 3.26 - Роза ветров для пыльных явлений на Аравийском полуострове

Второй по значимости является группа ветров северо-западного и близких к нему направлений. Судя по визуальной протяжённости соответствующих лепестков, суммарная доля ветров северо-северо-западного превышает половину всех случаев, что свидетельствует об определяющей роли синоптического потока, ориентированного с севера и северо-запада. Незначительные лепестки в секторах юго-запада и юго-юго-востока указывают на единичные случаи, при которых пыльные явления фиксировались при нетипичном направлении потока. Восточные румбы в выборке представлены слабо, а южное и юго-восточное направления проявляются единично.

Принимая во внимание, что выборка охватывает несколько десятков метеорологических станций, расположенных в северных, центральных и южных районах Аравийского полуострова, столь высокая концентрация случаев в северном секторе нельзя объяснить орографической экспозицией одной конкретной долины или котловины. Речь идёт о региональной закономерности, связанной с устойчивыми синоптическими механизмами циркуляции над полуостровом.

3.3.2 Распределение скоростей ветра по направлениям

Цветовая градация лепестков розы ветров позволяет провести детальный анализ скоростного состава ветра по каждому направлению. В северном секторе преобладают скорости диапазонов $[20,0-25,0)$, $[25,0-30,0)$ и свыше 30,0 узлов (жёлтый сегмент), на которые приходится большая часть суммарной высоты лепестка. Это означает, что при северном ветре, сопровождающем пыльные явления, господствуют умеренные и сильные скорости: значения 20–30 узлов ($\sim 37-56$ км/ч) фиксировались наиболее часто.

Диапазон скоростей 25,0–30,0 узлов (светло-зелёный сегмент) занимает значительную долю лепестка северного направления, тогда как скорости свыше 30 узлов (жёлтый сегмент) присутствуют исключительно в этом секторе. Это свидетельствует о том, что наиболее интенсивные пыльные события ассоциированы именно с сильным северным потоком. В то же время лепестки западного и юго-западного направлений характеризуются более мелкими, преимущественно низкоскоростными сегментами — диапазоны [10,0–15,0) и [15,0–20,0) узлов. Это указывает на меньшую интенсивность ветрового воздействия при нетипичных направлениях.

Минимальные скорости [0,0–5,0) и [5,0–10,0) узлов (тёмно-фиолетовый и тёмно-синий сегменты) встречаются в единичных случаях и не связаны с конкретным направлением. Вероятно, эти случаи отражают ситуации, когда пыльные явления наблюдались в условиях слабого градиентного ветра при преобладающей роли термической конвекции или орографических факторов. В целом скоростной состав выборки тяготеет к умеренным и высоким значениям: визуально заметно, что диапазоны [20,0–25,0) и [25,0–30,0) узлов формируют наибольшие доли в суммарной высоте лепестков, особенно в северном секторе.

3.3.3 Ветровой режим и перенос пыли

С точки зрения переноса минерального аэрозоля на Аравийском полуострове роза ветров указывает на устойчивую меридиональную ось транспорта, ориентированную с севера на юг. Именно при северном ветре с высокими скоростями создаются наиболее благоприятные условия для подъёма пыли с поверхности аридных равнин Месопотамии, Сирийской пустыни и Большого Нефуда и её последующего переноса в направлении центральной и южной Аравии. Дальность переноса при скоростях 25–35 узлов

(46–65 км/ч) может достигать нескольких тысяч километров за сутки, что подтверждается данными спутниковых наблюдений аэрозольного переноса над регионом.

Наряду с этим лепестки западного и юго-западного направлений, несмотря на их малую частоту, свидетельствуют о том, что в ряде случаев источниками пыли выступают западные районы полуострова — предгорья Хиджаза, а также северо-восточная Африка. Восточное направление в отдельных случаях может быть связано с переносом пыли со стороны Иранского нагорья и Месопотамской низменности к прибрежным районам Персидского залива. Таким образом, несмотря на доминирование северного переноса, эпизодические пыльные явления на полуострове реализуются при самых различных циркуляционных конфигурациях.

Важно отметить, что выборка охватывает несколько климатических сезонов (июль 2024 — январь 2026), включая как летний период господства шамала, так и переходные сезоны. Тем не менее доминирование северного направления сохраняется вне зависимости от сезона, что указывает на устойчивость данного механизма в генезисе пыльных явлений на протяжении всего исследуемого периода.

3.4 Анализ повторяемости синоптических ситуаций при пыльных явлениях на Аравийском полуострове

3.4.1 Общая характеристика синоптических ситуаций

Круговая диаграмма, отражающая распределение 30 случаев пыльных явлений по типам синоптических ситуаций, выявляет резко асимметричную структуру: три выделенных типа — ложбина, гребень и барическая седловина

— представлены крайне неравномерно. Ложбина занимает 73,3% всех случаев (22 из 30), гребень — 16,7% (5 случаев), барическая седловина — 10,0% (3 случая). Сумма долей составляет 100%, что подтверждает полноту классификации.

Повторяемость синоптических ситуаций
при пыльных явлениях на Аравийском полуострове

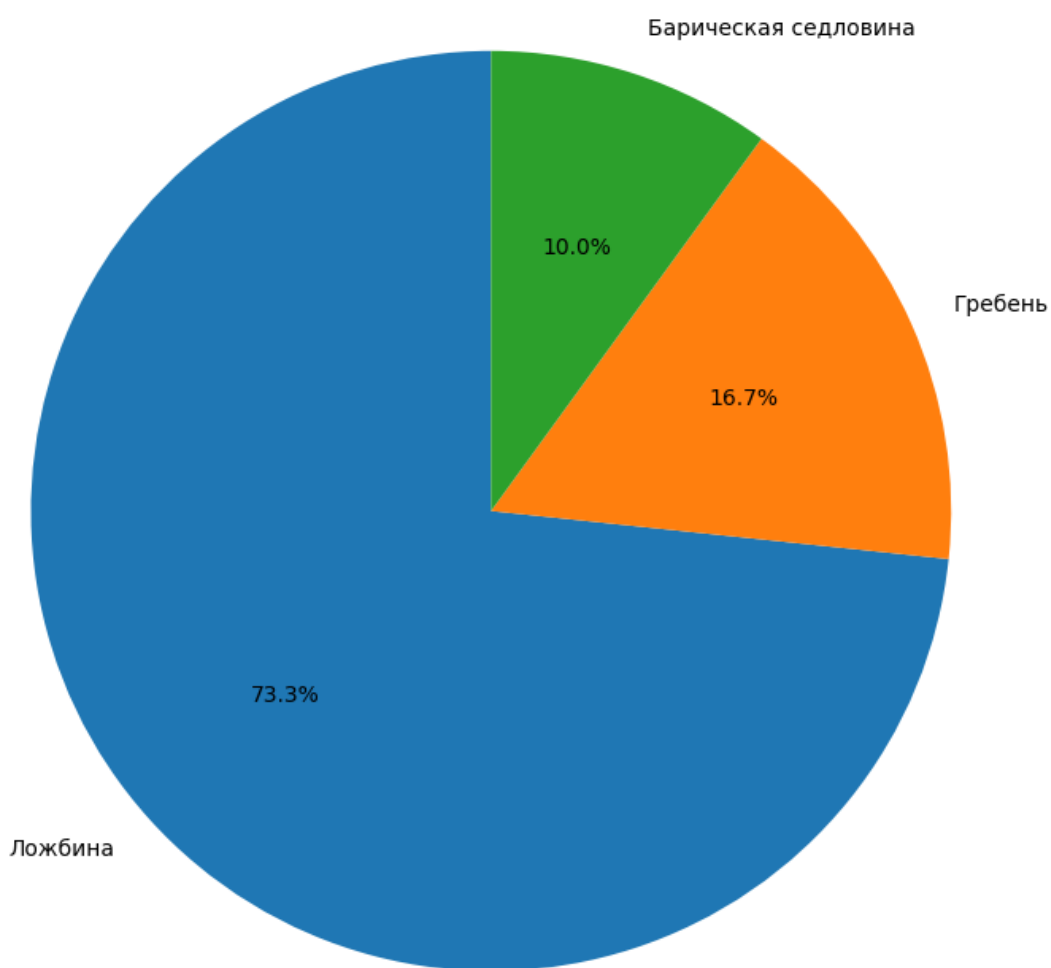


рис 3.27 - Повторяемость синоптических ситуаций при пыльных явлениях на Аравийском полуострове

Уже на уровне первичного осмотра диаграммы очевиден принципиальный вывод: три четверти всех зарегистрированных пыльных явлений связаны с одним синоптическим типом — барической ложбиной. Это не просто численное преобладание, а качественная доминанта, которая свидетельствует о том, что барическая ложбина является ключевым условием для возникновения пыльных явлений на Аравийском полуострове в исследуемый период.

3.4.2 Роль барической ложбины в формировании пыльных явлений

Барическая ложбина — вытянутая область пониженного давления, не замкнутая изобарами, — создаёт ряд условий, чрезвычайно благоприятных для подъёма и переноса пыли. В оси ложбины формируется сходямость (конвергенция) приземных потоков, которая усиливает восходящие движения воздуха и способствует переходу пылевых частиц из приземного слоя в нижнюю тропосферу. Вдоль передней части ложбины ускоряются геострофические ветры, что повышает их дефляционную активность на поверхности аридных субстратов. Ложбина обеспечивает прохождение атмосферных фронтов или их остатков над регионом, вызывая резкое усиление ветра и нередко сопровождаясь конвективной активностью.

Применительно к условиям Аравийского полуострова ложбина, как правило, связана с углублением термической депрессии над центральной Аравией или с прохождением холодного фронта со стороны Средиземноморья и Персидского залива. В обоих случаях формируется интенсивный приземный ветер северной или северо-западной составляющей — шамаль, — что полностью согласуется с данными розы ветров: доминирование северного направления (43,3%) и высоких скоростей (25–30 уз, и более) является прямым следствием ложбинного режима. Таким образом, роза ветров и диаграмма

синоптических ситуаций представляют собой два взаимодополняющих описания одного и того же физического явления: ложбина как причина — северный сильный ветер как следствие.

Из 22 ложбинных случаев большинство, по всей видимости, приходится именно на ситуации развитого шамала с максимальными скоростями ветра. Это косвенно подтверждается тем, что в розе ветров сегменты скорости свыше 25 узлов и более 30 узлов представлены только в северном секторе, а не в других направлениях, связанных с иными синоптическими типами.

3.4.3 Вклад гребня и барической седловины

Гребень — вытянутая область повышенного давления — в данной выборке составляет 16,7% случаев (5 эпизодов). На первый взгляд это кажется парадоксальным: в условиях антициклонического гребня горизонтальные градиенты давления ослаблены, ветры умеренные, восходящие движения подавлены. Тем не менее пыльные явления в гребневых ситуациях вполне возможны по нескольким причинам. Прежде всего, в периферийных зонах гребня, примыкающих к соседним барическим структурам, ветровые скорости могут быть достаточны для дефляции рыхлых поверхностей. Кроме того, антициклонический гребень над Аравийским полуостровом нередко сопровождается развитой термической конвекцией в дневные часы при высоких температурах приземного воздуха (40–45 °C), что обеспечивает конвективный подъём пыли без значительных горизонтальных ветровых скоростей. В таких случаях пыльные явления носят более локальный характер и не сопровождаются дальним переносом аэрозоля.

Барическая седловина — область между двумя ложбинами и двумя гребнями с нейтральным распределением давления — представлена в выборке наименее часто: 3 случая, или 10,0%. Седловина характеризуется

неустойчивым и слабо определённым ветровым полем, в котором могут развиваться разнонаправленные потоки и мезомасштабные вихри. В условиях аридного климата и высоких температур поверхности даже при слабых синоптических ветрах тепловые вихри (dust devils) и конвективные системы способны поднимать и удерживать пылевые частицы в атмосфере. Именно такими механизмами, по всей видимости, объясняются три случая пыльных явлений при барической седловине, зафиксированных в данной выборке.

3.4.4 Синоптические условия и региональные особенности

С учётом того, что наблюдательная сеть охватывала несколько государств Аравийского полуострова — от северных приграничных районов (Кувейт, север Саудовской Аравии) до южных и прибрежных (Йемен, Оман), — преобладание ложбинного типа свидетельствует о том, что данная синоптическая конфигурация одновременно затрагивала значительную часть территории полуострова. Это согласуется с известной региональной климатологией: арабская тепловая ложбина и её взаимодействие со средиземноморскими и иранскими барическими системами обуславливают синхронное ухудшение пыльности сразу на нескольких метеорологических станциях в один и тот же срок.

Случаи, связанные с гребнем и седловиной (суммарно 8 случаев, 26,7%), напротив, могут соответствовать более локальным или термически обусловленным пыльным явлениям, реализующимся на отдельных станциях в условиях слабой синоптической принуждённости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая магистерская диссертация посвящена комплексному анализу условий формирования пыльных бурь на Аравийском полуострове с использованием методов спутникового дистанционного зондирования, реанализа и данных наземных метеорологических наблюдений. В результате проведённого исследования получены следующие основные результаты.

1. Обобщена теоретическая база знаний о пыльных бурях применительно к условиям Аравийского полуострова. Отмечается, что регион обладает уникальным сочетанием факторов, определяющих его высокую пылевую активность: экстремально аридным климатом, обширными площадями незакреплённых аллювиальных и эоловых отложений (Руб-эль-Хали, Нефуд, себхи Персидского залива, Месопотамская низменность), устойчивыми ветровыми системами (шамаль, хабуб, кяус) и высокой термодинамической нестабильностью атмосферы в летний сезон.

2. Обоснован выбор методологии исследования и детально охарактеризованы спутниковые инструменты, применённые в работе. Показано, что для комплексного анализа пыльных бурь над Аравийским полуостровом наиболее эффективно совместное использование сенсоров (MODIS, VIIRS) для восстановления AOD, SEVIRI в схеме Dust RGB для непрерывного слежения за пылевыми фронтами, приборов OMI (AI, UVAI) и AIRS (Dust Score) для характеристики вертикальной структуры аэрозоля, сети AERONET для независимой верификации, а также данных реанализа MERRA-2 — для диагностики динамических условий.

3. Проведён детальный анализ двух интенсивных пылевых событий. Пыльная бурь 29 апреля 2024 г. (Вади-эль-Давасир) сформировалось в условиях барической ложбины над центральной Аравией, обусловившей северо-западный шамальный поток со скоростями 28 узлов у поверхности. Запас пыли (DCM) по MERRA-2 превышал 300 мг/м² над большей частью

полуострова; оптическая толщина аэрозоля по AERONET достигала 3–5 единиц; значение UVAI ($> 4,0$) непосредственно над котловиной свидетельствовало о вертикальном подъёме пыли выше уровня нижней тропосферы. Все применённые спутниковые алгоритмы (Deep Blue, Dust Score Day, параметр Ангстрёма) идентифицировали аэрозоль как крупнодисперсную минеральную пыль. Горизонтальная видимость у поверхности по данным METAR OEWD составила 100 м (явление +DS), что подтверждает экстремальный характер события.

Пыльная бурь 4 мая 2025 г. (Кувейт) характеризовалось сложным взаимодействием синоптической ложбины над Персидским заливом с конвективными системами, что привело к формированию комбинированного явления — грозовой пыльной бури. По данным METAR OKKK, преобладающая видимость составила 300 м при скорости ветра 15 м/с (310°). Многоспектральный анализ в схеме Dust RGB позволил чётко разграничить конвективную облачность и пылевой аэрозоль; Кувейт находился на границе этих зон — в зоне активного пылевого фронта. Алгоритм Deep Blue NOAA-20/VIIRS однозначно идентифицировал тип аэрозоля над всем регионом как минеральную пыль; высокие дневные и ночные значения Dust Score AIRS свидетельствовали о подъёме пыли в средние слои тропосферы.

4. На основе анализа 30 случаев пыльных явлений с использованием данных многостанционной наблюдательной сети Аравийского полуострова за период апрель 2024 — январь 2026 г. выявлены количественные характеристики ветрового режима. Доминирующим направлением ветра является северное с повторяемостью 43,3%; суммарная доля ветров северной четверти (С - СЗ - ССВ) составляет 63,3%. Наиболее интенсивные пыльные события (скорости > 13 м/с) ассоциированы исключительно с северным направлением, что указывает на шамаль как на главный механизм пылеподъёма и переноса. Средняя скорость ветра при пыльных явлениях составила 10.8 м/с.; в 40% случаев скорость превышала 13 м/с. Главная ось

атмосферного переноса пыли ориентирована с севера-северо-запада на юго-юго-восток, от Месопотамских источников — к акватории Аравийского моря.

5. Классификация 30 пыльных случаев по синоптическому типу показала абсолютное доминирование барической ложбины: 22 случая (73,3%). Гребень наблюдался в 5 случаях (16,7%), барическая седловина — 3 случая (10,0%). Преобладание ложбинного типа обусловлено тем, что именно этот барический тип обеспечивает одновременно конвергенцию приземных потоков, ускорение северных ветров и прохождение атмосферных фронтов, что в совокупности создаёт наиболее эффективные условия для массового пылеподъёма на аридных поверхностях полуострова. Случаи с гребнем и седловиной соответствуют более локальным явлениям, обусловленным термической конвекцией при слабом синоптическом ветре.

Таким образом, выдвинутая в начале работы гипотеза о ведущей роли барической ложбины и шамального потока в формировании пыльных бурь на Аравийском полуострове получила убедительное количественное подтверждение как на основе статистической обработки 30 задокументированных случаев.

Научная значимость выполненного исследования определяется разработкой и апробацией комплексной методологии анализа пыльных бурь, объединяющей шесть независимых спутниковых продуктов с данными реанализа и наземных наблюдений. Показано, что совместное применение этих источников позволяет получать взаимно верифицированную картину пылевого события — от синоптических условий возникновения до вертикальной структуры аэрозольного слоя и приземных метеорологических условий.

Практическая значимость работы состоит в том, что установленные закономерности — прежде всего доминирование барической ложбины как синоптического предиктора (73,3%) и критерий скорости ветра > 13 м/с с северного направления — могут быть непосредственно использованы при

разработке алгоритмов краткосрочного прогнозирования пыльных бурь для авиационных и гидрометеорологических служб стран Аравийского полуострова. Результаты анализа AOD и типа аэрозоля представляют интерес для служб экологического мониторинга и охраны здоровья населения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shepherd G. и др. Global assessment of sand and dust storms. United Nations Environment Programme (UNEP), 2016.
2. Samman A. E., Butt M. J. Evaluating the Performance of MODIS and MERRA-2 AOD Retrievals Using AERONET Observations in the Dust Belt Region // Earth. MDPI, 2025. Т. 6, № 4. С. 115.
3. Cuevas Agulló E. Establishing a WMO sand and dust storm warning advisory and assessment system regional node for West Asia: Current capabilities and needs: Technical report. World Meteorological Organization, 2013.
4. Gu Z., Wei W., Zhao Y. An overview of surface conditions in numerical simulations of dust devils and the consequent near-surface air flow fields // Aerosol Air Qual. Res. Springer, 2010. Т. 10, № 3. С. 272–281.
5. د. مصطفى فالح عبيد الحساني, م. م شيماء صالح جاسم الوسمي. التغيرات المناخية وبعض الظواهر الناتجة عنها. 2025. 215–211.
6. Виноградов Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. Москва: Наука, 1984. 320 с.
7. Жуков В. Т., Сербенюк С. Н., Тикунов В. С. Математико-картографическое моделирование в географии. Москва: Мысль, 1980. 224 с.
8. Кондратьев К. Я. Аэрозоль и климат. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 541 с.
9. Лазарев А. Н. Синоптические процессы на Аравийском полуострове и их влияние на атмосферную циркуляцию // Метеорология и гидрология. 2015. С. 12–23.
10. Лошаков В. Г. Современные методы дистанционного зондирования Земли. 2018. 280 с.

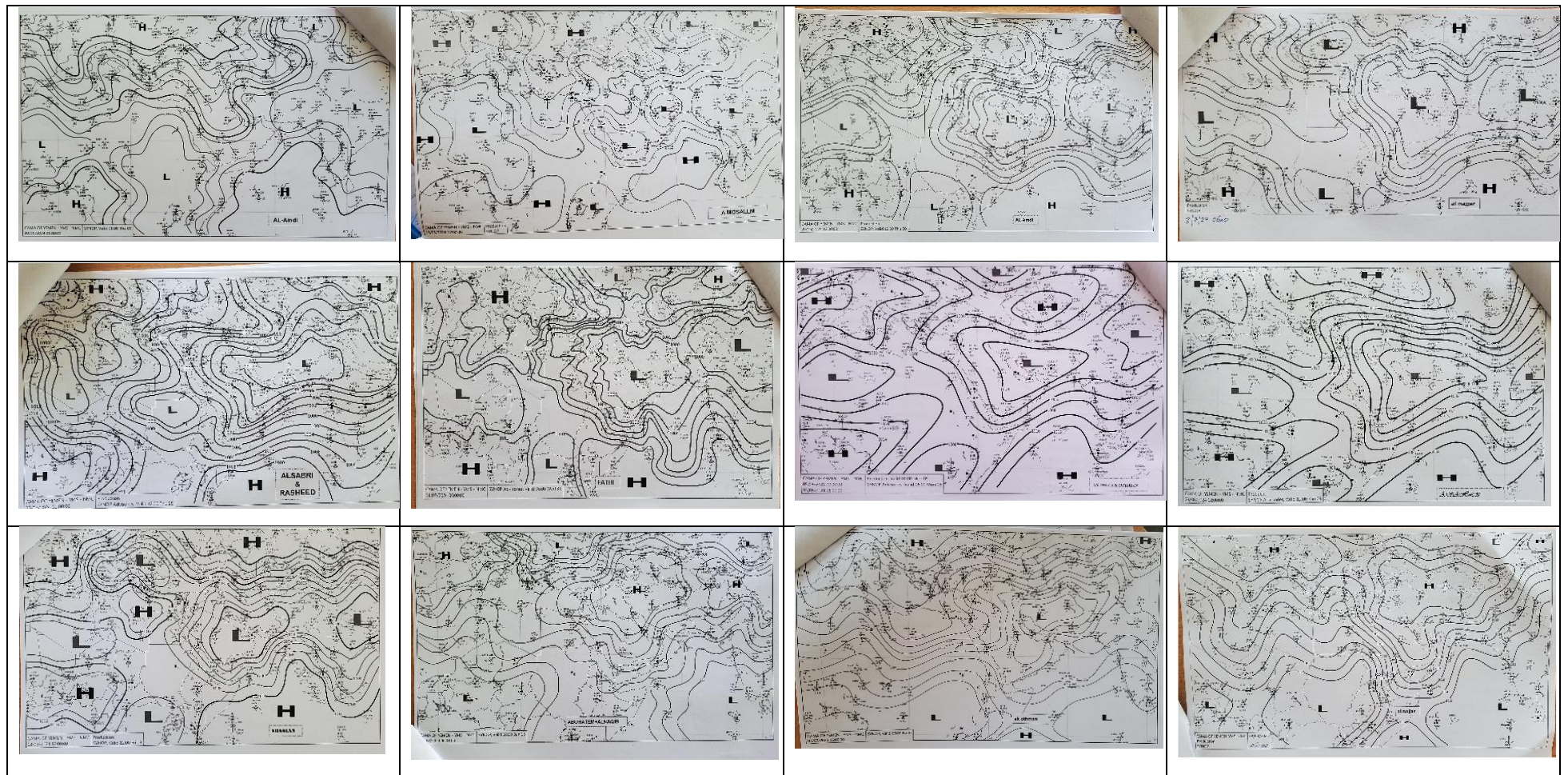
11. Морозов А. Е., Стародубцева Н. И. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы. 2020.
12. Miller S. D. и др. Haboob dust storms of the southern Arabian Peninsula // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Wiley Online Library, 2008. Т. 113, № D1.
13. Lian L. и др. A comprehensive review of dust events: characteristics, climate feedbacks, and public health risks // Curr. Pollut. Rep. Springer, 2025. Т. 11, № 1. С. 18.
14. Al-Dousari A. M., Doronzo D. M., Ahmed M. Types, Indications and Impact Assessment of Sand and Dust Storms in the Arabian Gulf Region // Atmosphere (Basel). 2017. Т. 8, № 12. С. 249.
15. Ali Al-Hemoud и др. Health Impact Assessment Associated with Exposure to PM10 and Dust Storms in Kuwait // Atmosphere (Basel). 2018. Т. 9, № 1. С. 9.
16. Adamo N. и др. Climate change: Droughts and increasing desertification in the Middle East, with special reference to Iraq // Engineering. Scientific Research Publishing, 2022. Т. 14, № 7. С. 235–273.
17. Al-Obed M., Uddin S., Ramadhan A. Dust storm satellite images // Atlas of fallen dust in Kuwait. Springer, 2021. С. 1–46.
18. Mahreen K. The environmental impacts of war and conflict. The Institute of Development Studies and Partner Organisations, 2022.
19. Dee D. P. и др. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, QJ Roy. Meteor. Soc., 137, 553–597. 2011.
20. Middleton N. J., Goudie A. S., Wells G. L. The frequency and source areas of dust storms // Aeolian geomorphology. Routledge, 2020. С. 237–259.
21. Schepanski K. Transport of mineral dust and its impact on climate // Geosciences (Basel). MDPI, 2018. Т. 8, № 5. С. 151.
22. Gupta P. и др. A surface reflectance scheme for retrieving aerosol optical depth over urban surfaces in MODIS Dark Target retrieval algorithm //

- Atmos. Meas. Tech. Copernicus Publications Göttingen, Germany, 2016. T. 9, № 7. С. 3293–3308.
23. Evan A. T. и др. The past, present and future of African dust // Nature. Nature Publishing Group UK London, 2016. T. 531, № 7595. С. 493–495.
 24. Freitas S. R. и др. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America // Environmental Fluid Mechanics. Springer, 2005. T. 5, № 1. С. 135–167.
 25. Gandham H. и др. Major changes in extreme dust events dynamics over the Arabian Peninsula during 2003–2017 driven by atmospheric conditions // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Wiley Online Library, 2020. T. 125, № 24. С. e2020JD032931.
 26. Gama C. и др. Performance assessment of CHIMERE and EURAD-IM'dust modules // Atmos. Pollut. Res. Elsevier, 2019. T. 10, № 4. С. 1336–1346.
 27. Kim D. и др. Dust optical properties over North Africa and Arabian Peninsula derived from the AERONET dataset // Atmos. Chem. Phys. Copernicus Publications Göttingen, Germany, 2011. T. 11, № 20. С. 10733–10741.
 28. Akhlaq M., Sheltami T. R., Mouftah H. T. A review of techniques and technologies for sand and dust storm detection // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. Springer, 2012. T. 11, № 3. С. 305–322.
 29. National Weather Service [Электронный ресурс]. URL: <https://www.weather.gov/about/satellites> (дата обращения: 20.04.2026).
 30. Hand J. L. и др. Comparisons of aerosol properties measured by impactors and light scattering from individual particles: refractive index, number and volume concentrations, and size distributions // Atmos. Environ. Elsevier, 2002. T. 36, № 11. С. 1853–1861.
 31. Cunningham J. D., Bloom H. J., Nelson C. S. National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System: meeting future user needs for

- Earth system observations // Weather and Environmental Satellites. SPIE, 2004. T. 5549. C. 1–10.
32. Wang Q. и др. Evaluation and comparison of VIIRS dark target and deep blue aerosol products over land // Science of The Total Environment. Elsevier, 2023. T. 869. C. 161667.
 33. Phillips P. и др. Overview of calibration and validation activities for the EUMETSAT polar system: second generation (EPS-SG) visible/infrared imager (METimage) // Sensors, Systems, and next-generation satellites xX. SPIE, 2016. T. 10000. C. 162–172.
 34. Huang J. и др. CALIPSO inferred most probable heights of global dust and smoke layers // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Wiley Online Library, 2015. T. 120, № 10. C. 5085–5100.
 35. Kalashnikova O. V и др. MISR Dark Water aerosol retrievals: operational algorithm sensitivity to particle non-sphericity // Atmos. Meas. Tech. Copernicus Publications Göttingen, Germany, 2013. T. 6, № 8. C. 2131–2154.
 36. Filioglou M. Atmospheric profiling using the lidar technique. Ilmatieteen laitos, 2020.
 37. Roskovensky J. K., Liou K. N. Differentiating airborne dust from cirrus clouds using MODIS data // Geophys. Res. Lett. Wiley Online Library, 2005. T. 32, № 12.
 38. Sheel V., Guleria R. P., Ramachandran S. Global and regional evaluation of a global model simulated AODs with AERONET and MODIS observations // International Journal of Climatology. Wiley-Blackwell, 2017. T. 38. C. 269–289.
 39. Remer L. A. и др. The dark target algorithm for observing the global aerosol system: Past, present, and future // Remote Sens. (Basel). MDPI, 2020. T. 12, № 18. C. 2900.

40. Sagar Parajuli, Imen Gherboudj, Hosni Ghedira. Evaluation of the effect of soil moisture and wind speed on dust emission using aeronet, seviri, soil moisture and wind speed data. 2012.
41. Jiao P. и др. Next-generation remote sensing and prediction of sand and dust storms: State-of-the-art and future trends // *Int. J. Remote Sens.* Taylor & Francis, 2021. Т. 42, № 14. С. 5277–5316.
42. Lee J. и др. Machine learning based algorithms for global dust aerosol detection from satellite images: Inter-comparisons and evaluation // *Remote Sens. (Basel)*. MDPI, 2021. Т. 13, № 3. С. 456.
43. Liu Y., Huang J., Huang F. A comprehensive review on study methods of aerosol optical properties in different dimensions // *IEEE Access*. IEEE, 2023. Т. 11. С. 36763–36786.
44. Fountoukis C. и др. Anatomy of a severe dust storm in the Middle East: Impacts on aerosol optical properties and radiation budget // *Aerosol Air Qual. Res.* Springer, 2020. Т. 20, № 1. С. 155–165.
45. Nelli N. и др. Characteristics of atmospheric aerosols over the UAE inferred from CALIPSO and sun photometer aerosol optical depth // *Earth and Space Science*. Wiley Online Library, 2021. Т. 8, № 6. С. e2020EA001360.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



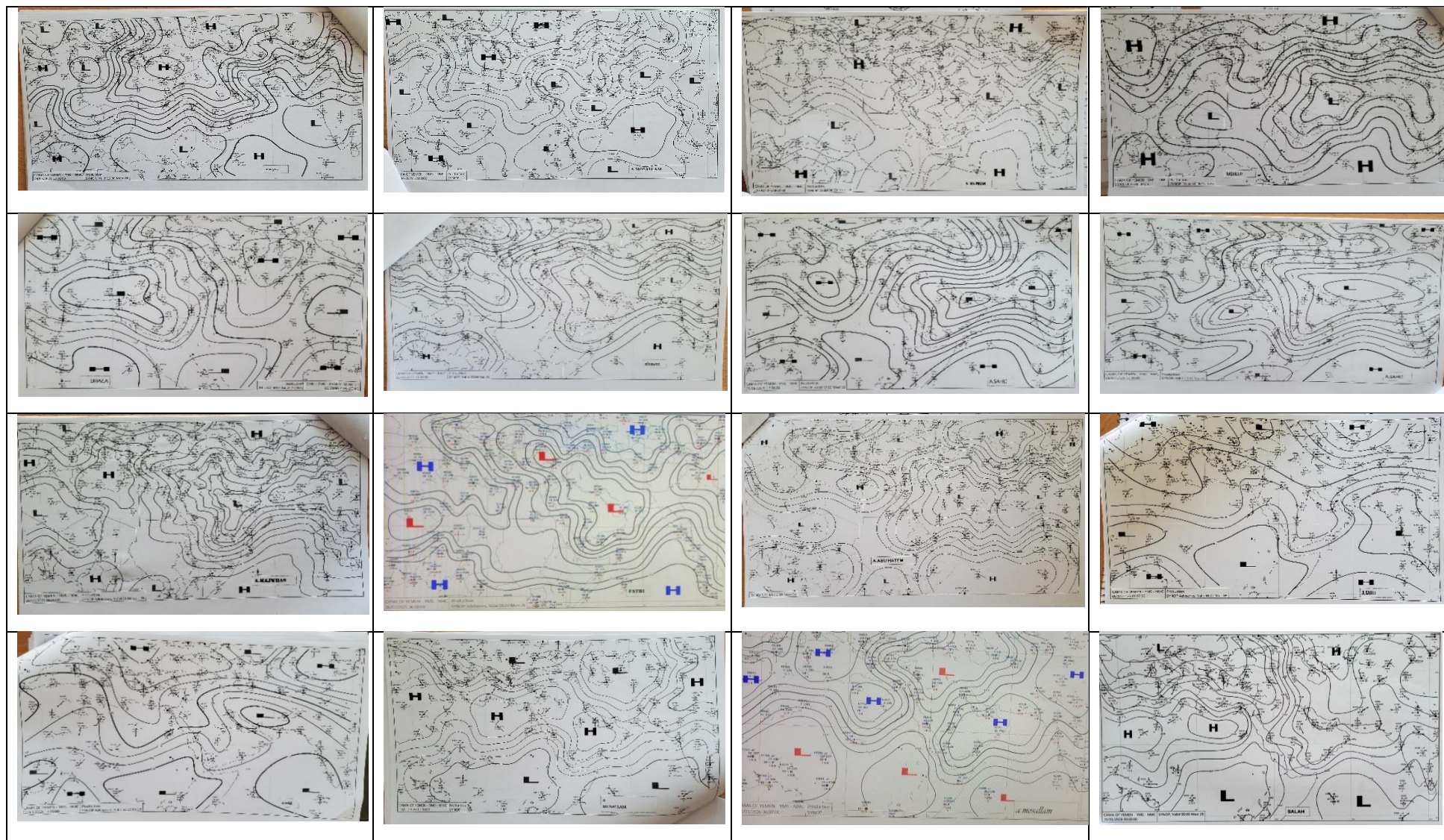
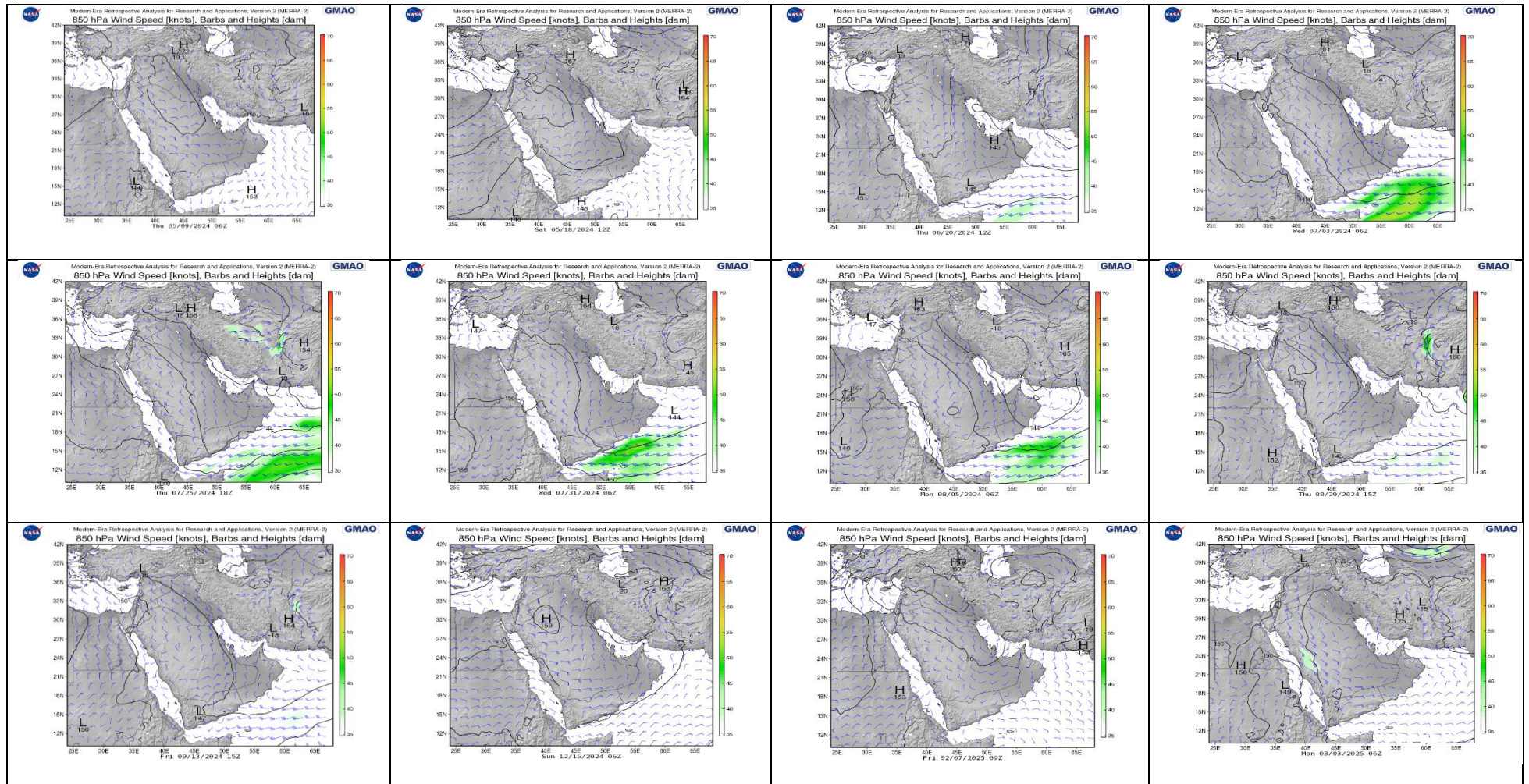


рис А.1 - Синоптические приземные карты, 2024-2026 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



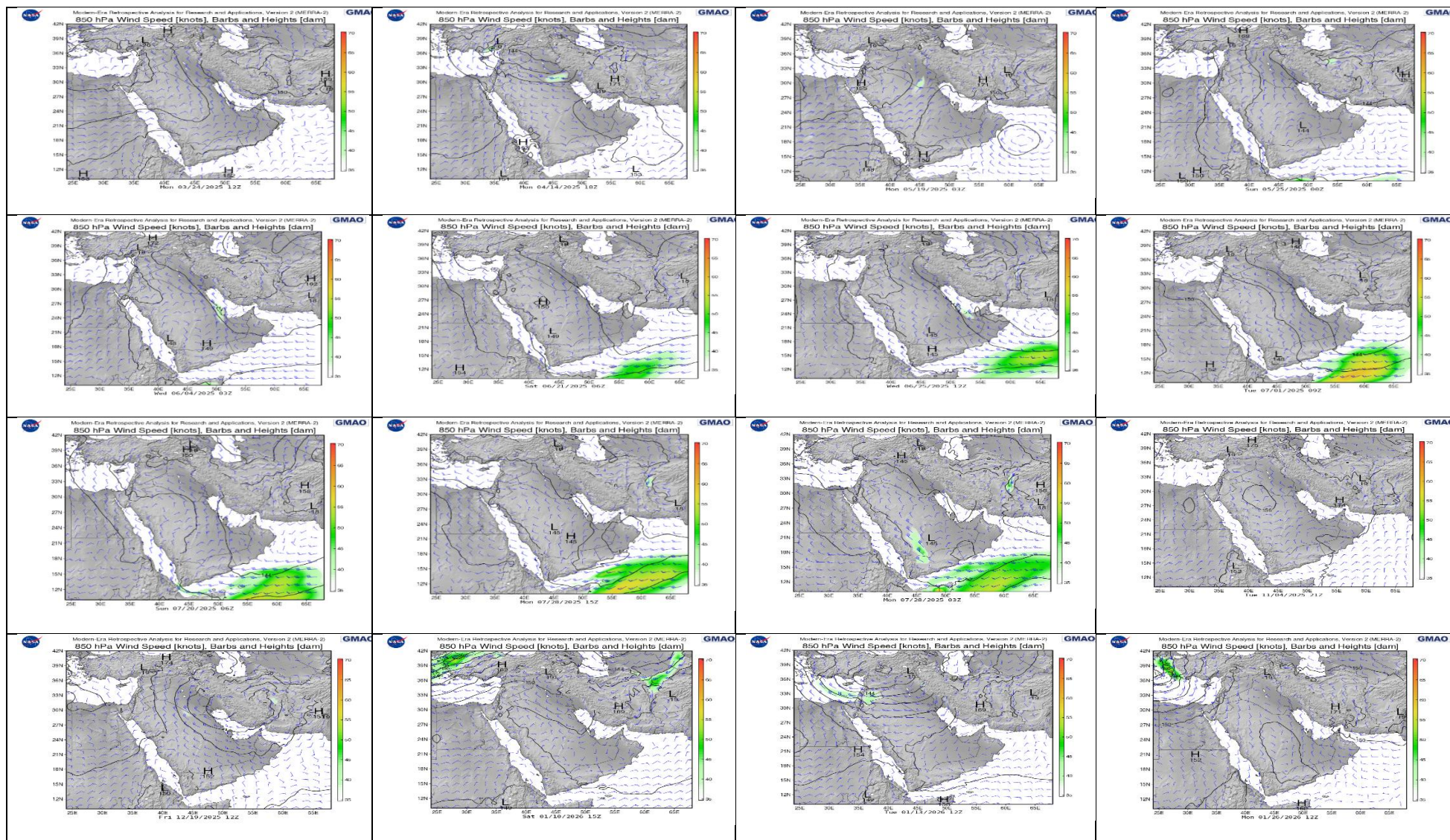
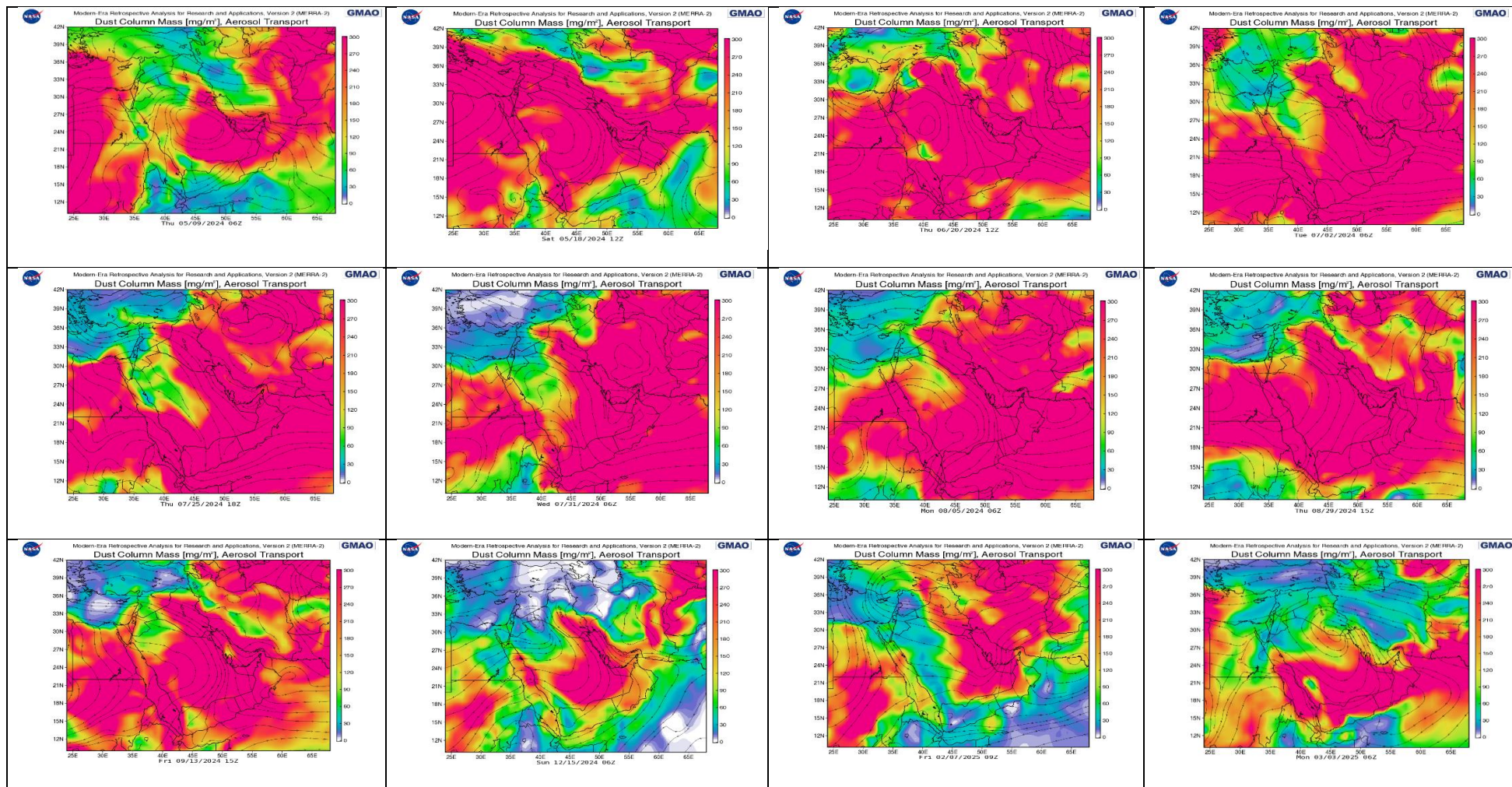


рис Б.1 – Карты поля ветра на 850 гПа по данным реанализа Merra 2, 2024-2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



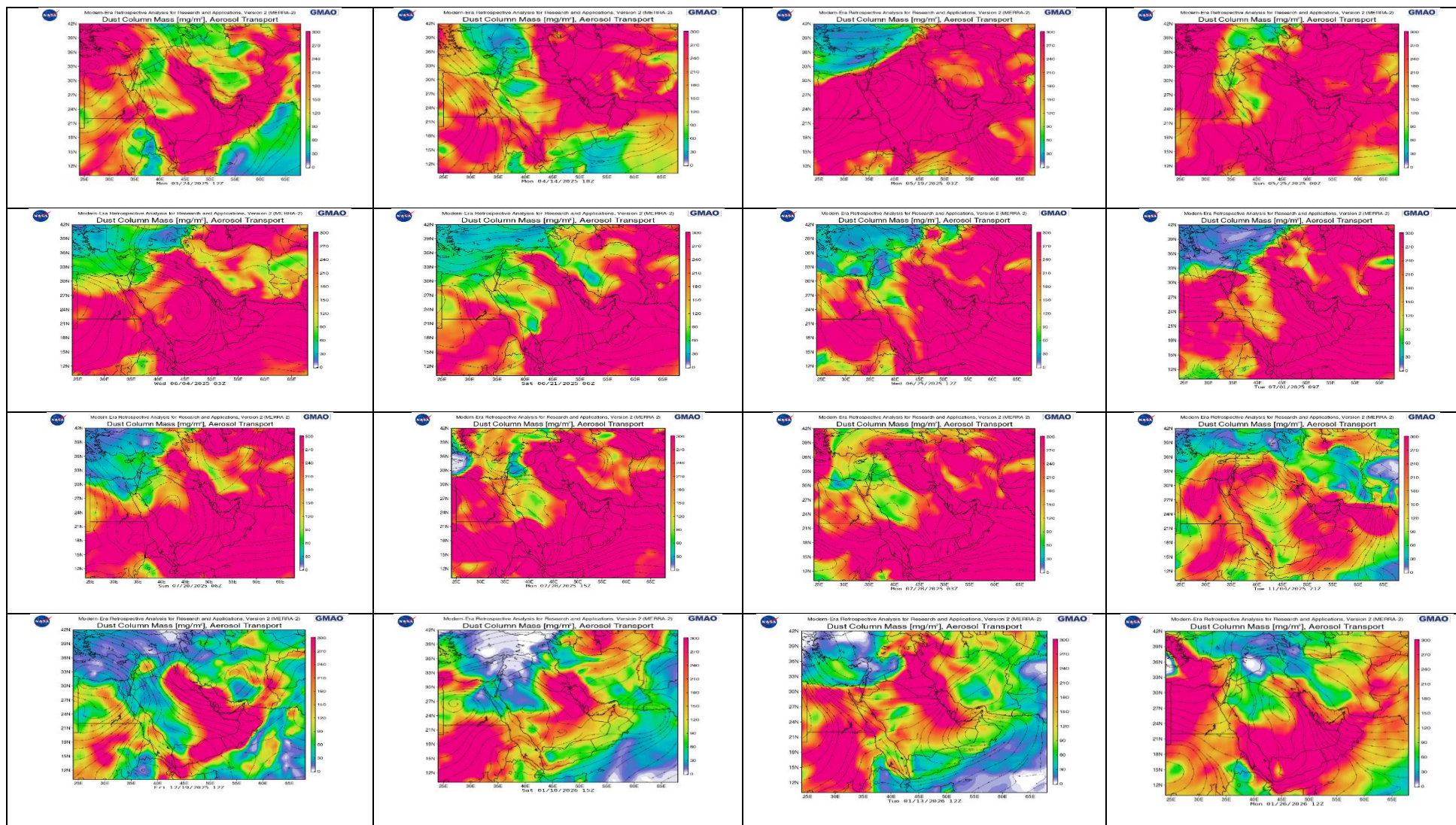
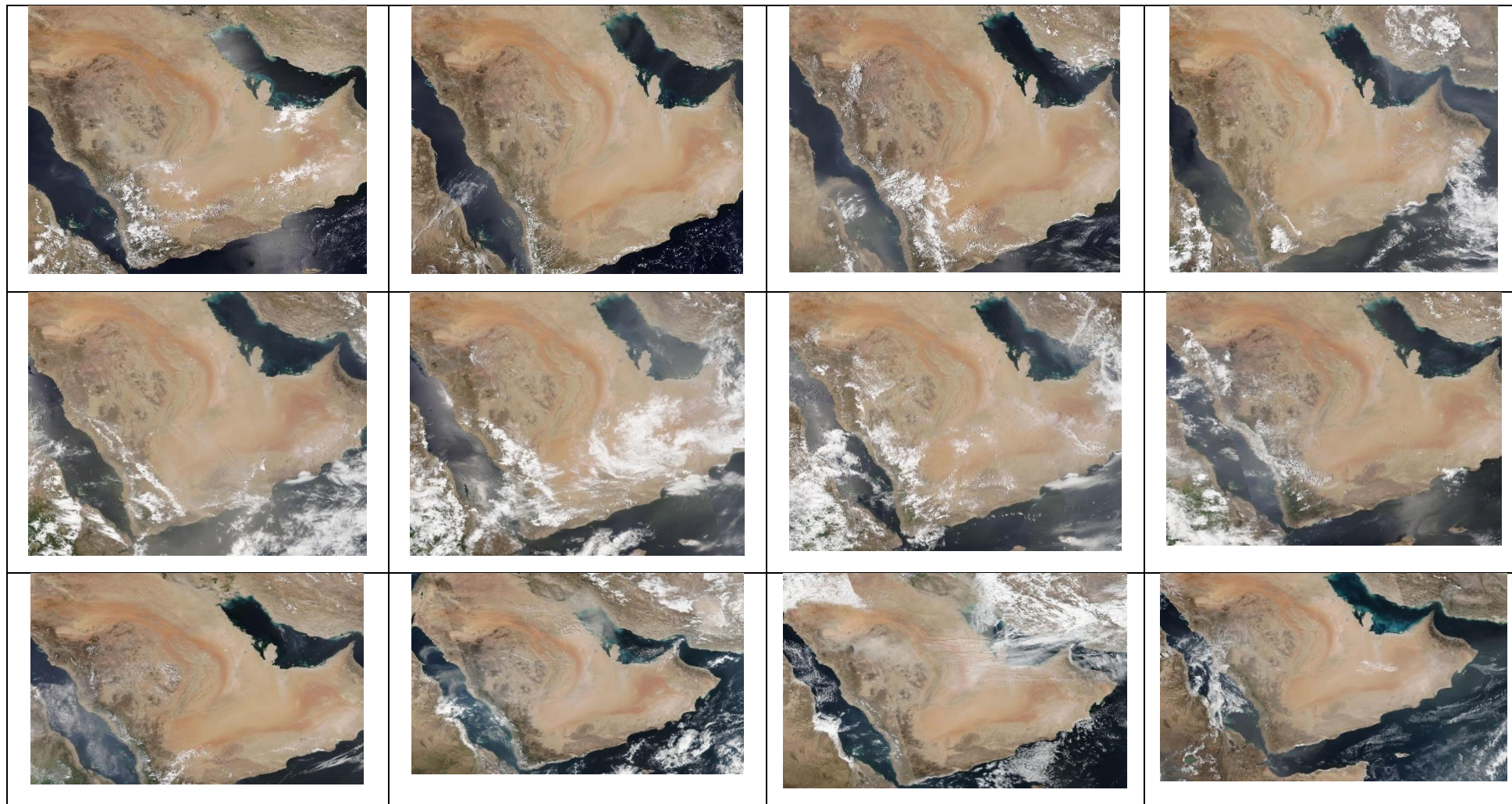


рис В.1 – Карты Массы пыли в столбе атмосферы (мг/м²) и аэрозольный перенос по данным реанализа Merra 2, 2024-2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



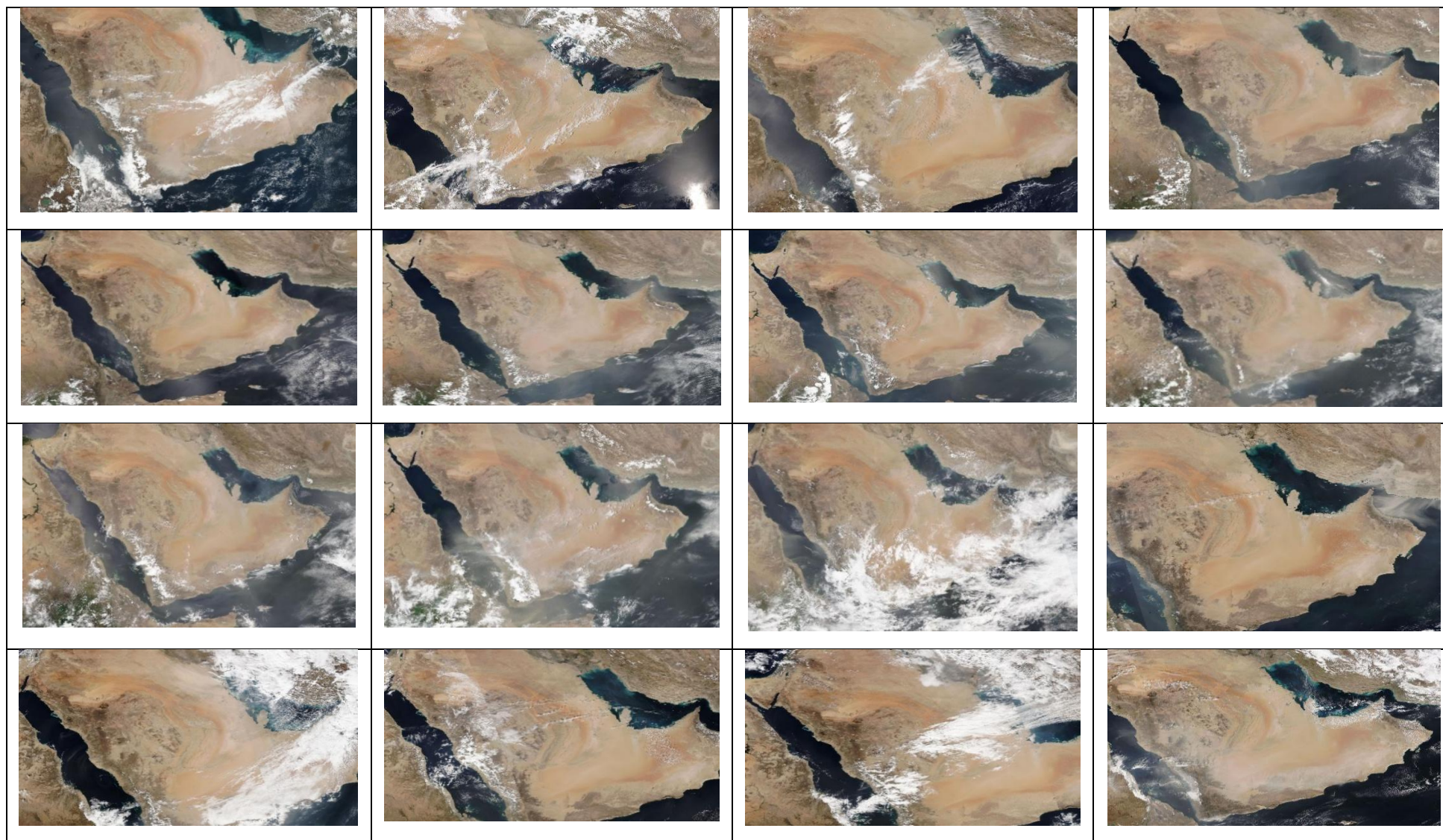
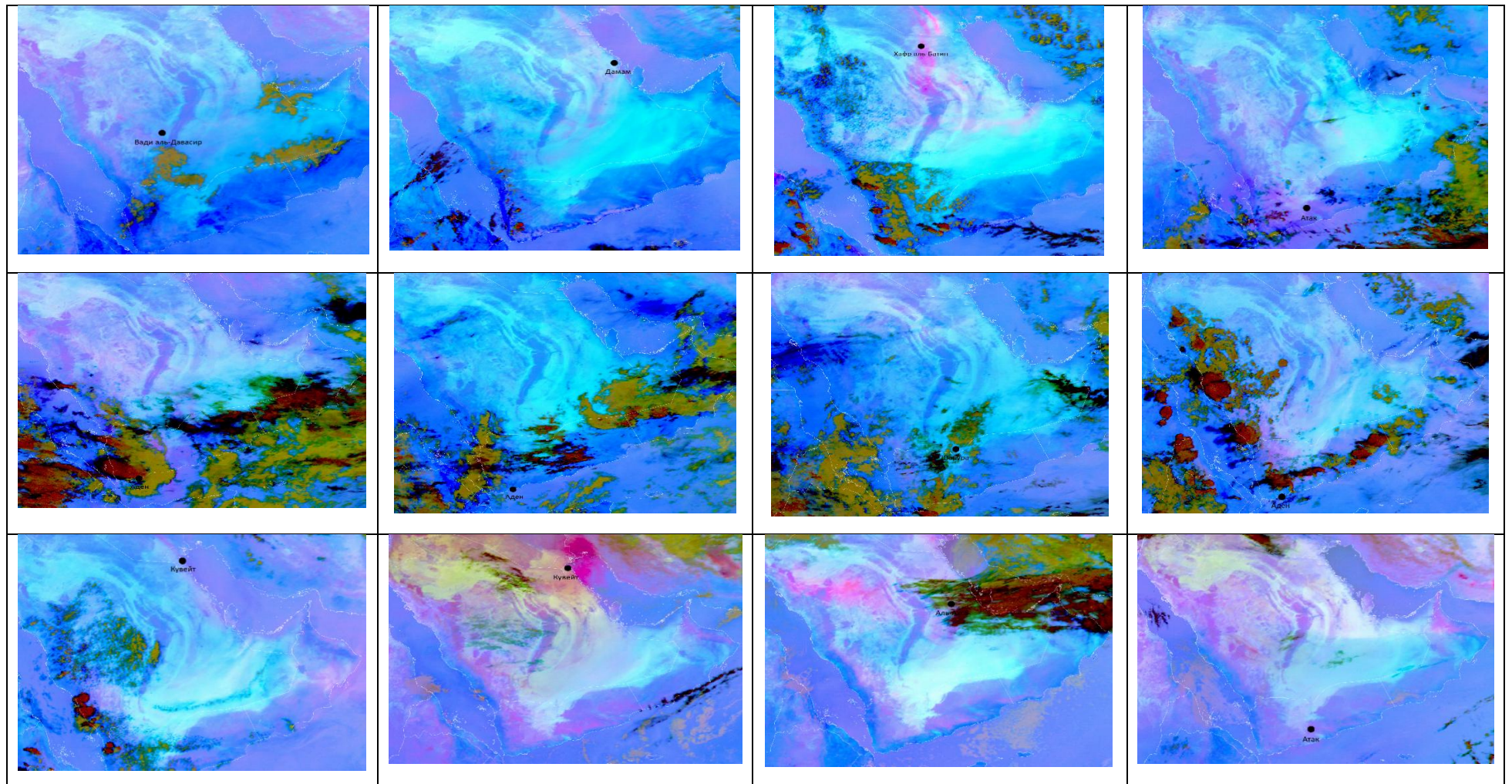


рис Г.1 - Спутниковые снимки VIIRS/NOAA20, NOAA21, 2024-2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



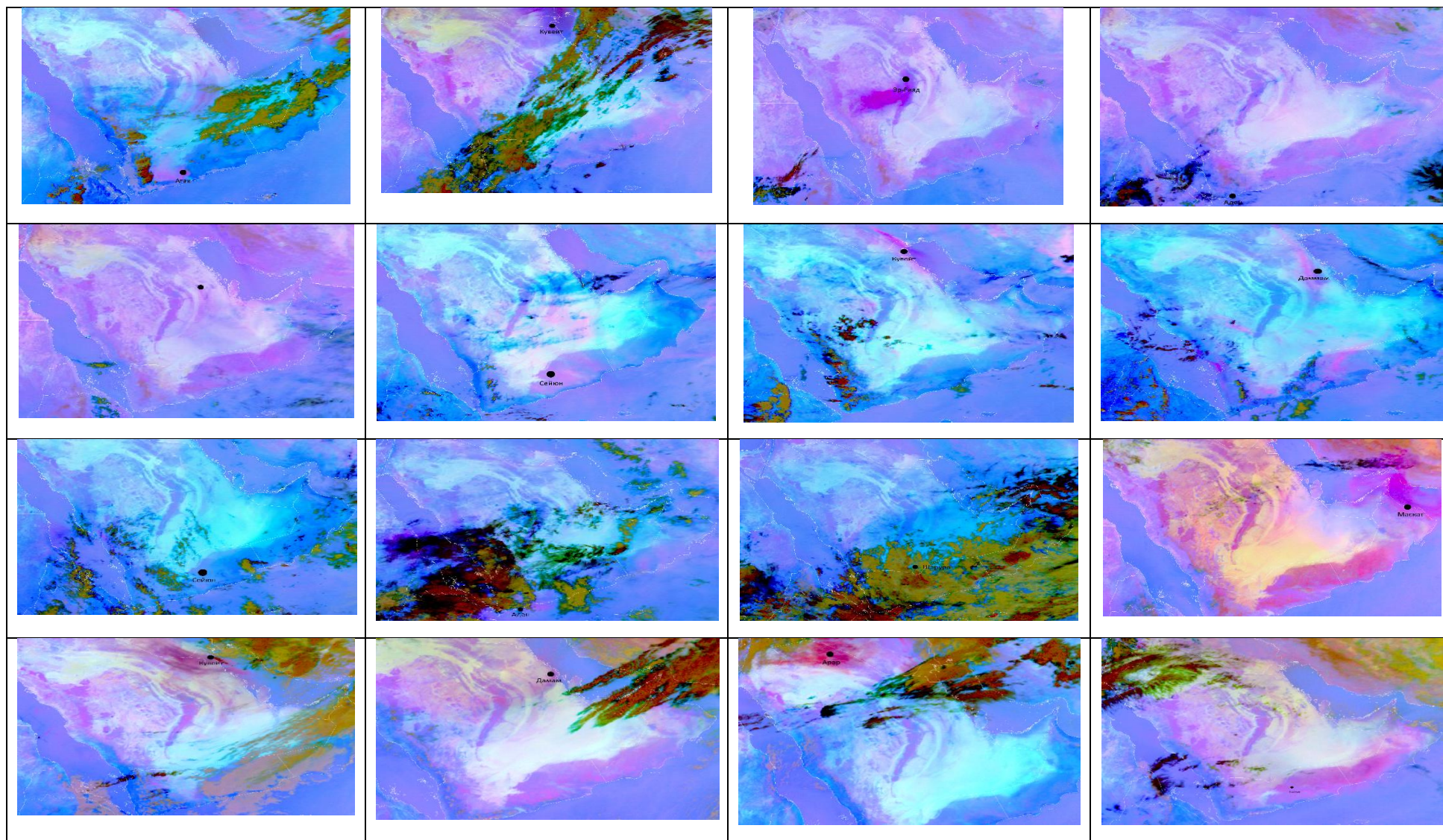
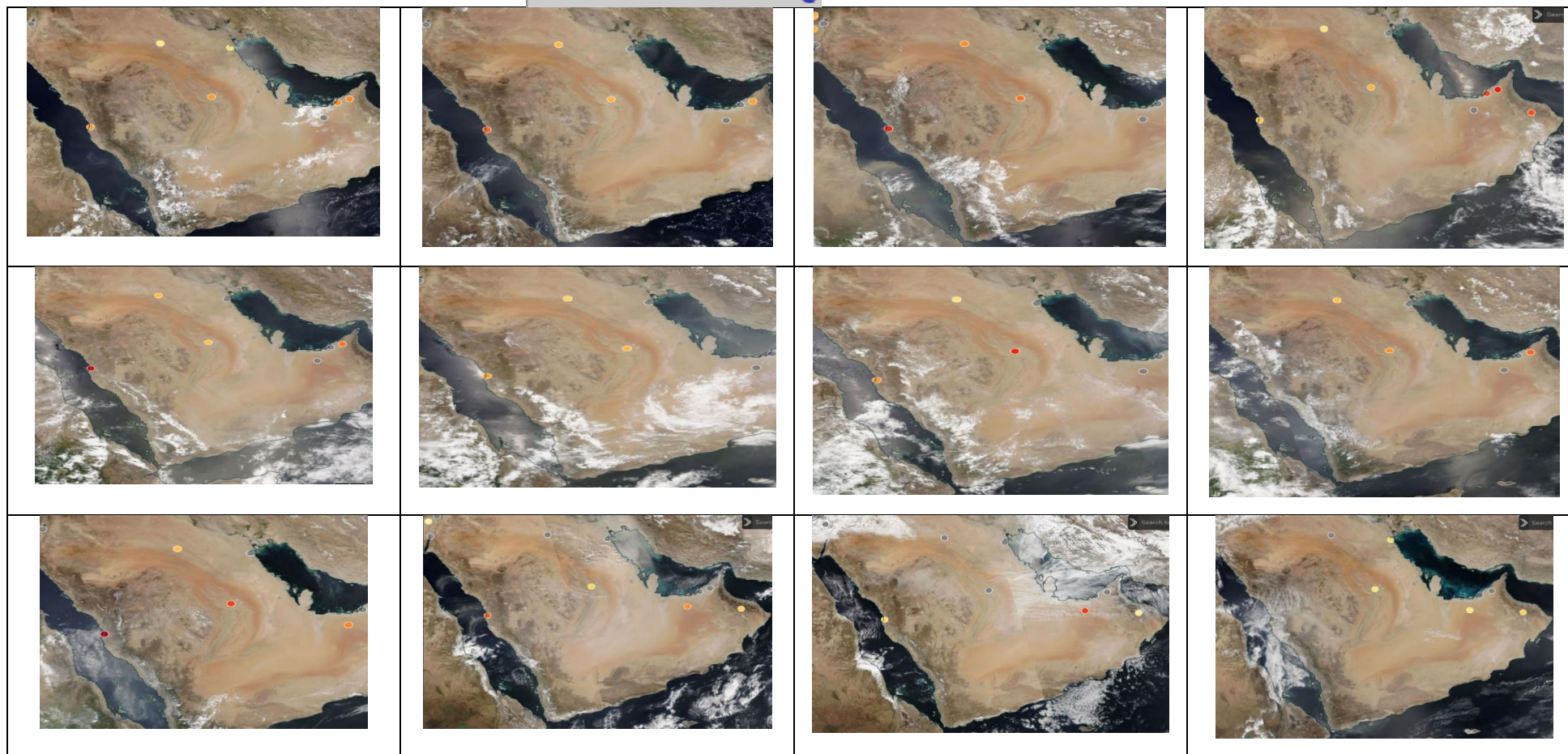
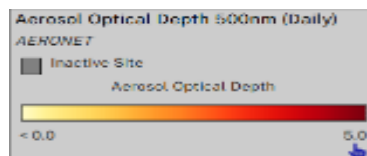


рис Д.1 – Цветосинезированные спутниковые снимки Dust RGB, Meteosat/MSG, 2024-2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Единая цветовая шкала для всех карт:



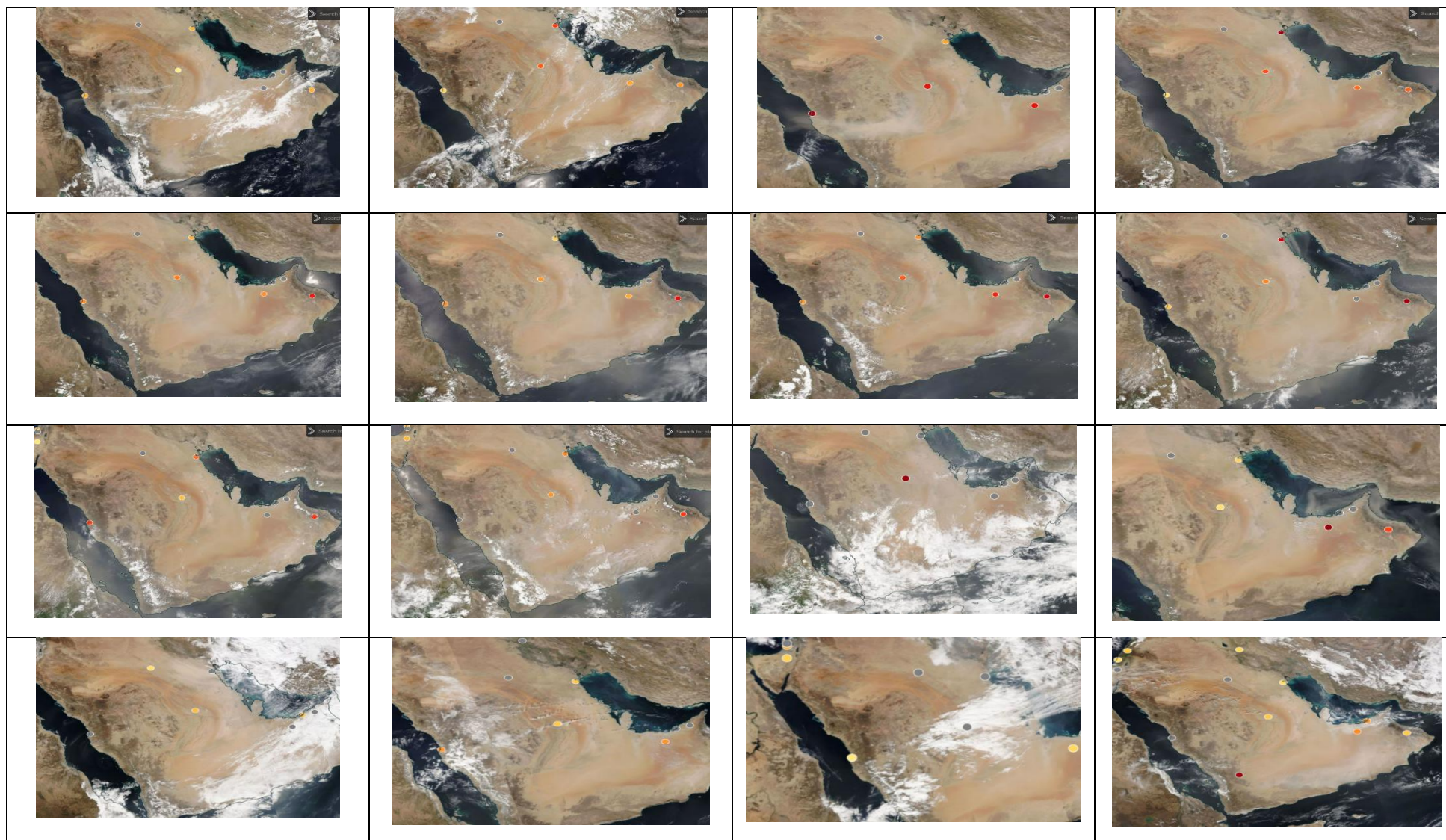
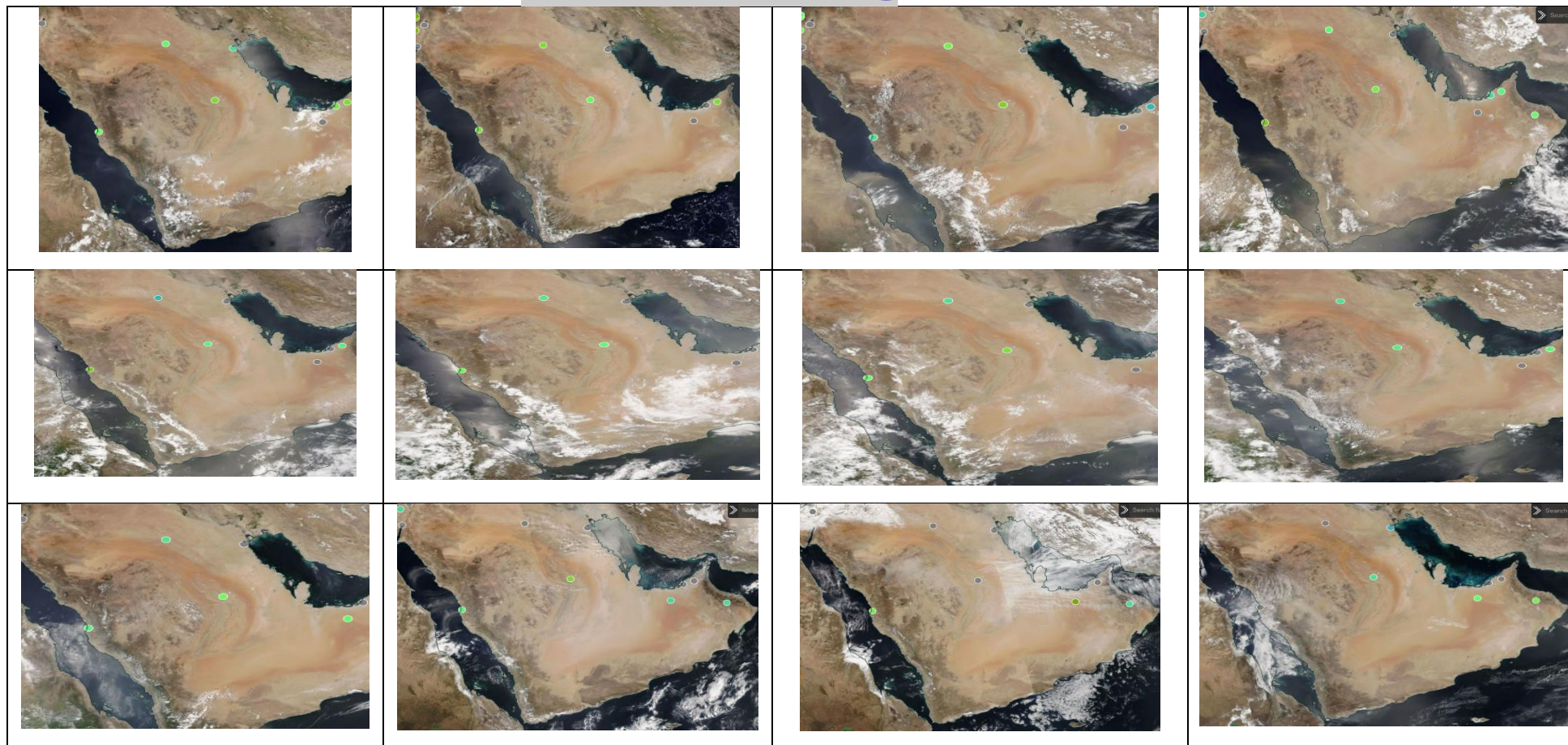


рис Е.1 - Карты аэрозольной оптической толщины (AOD) Aeronet на длине волны 500 нм, 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ё

Единая цветовая шкала для всех карт:



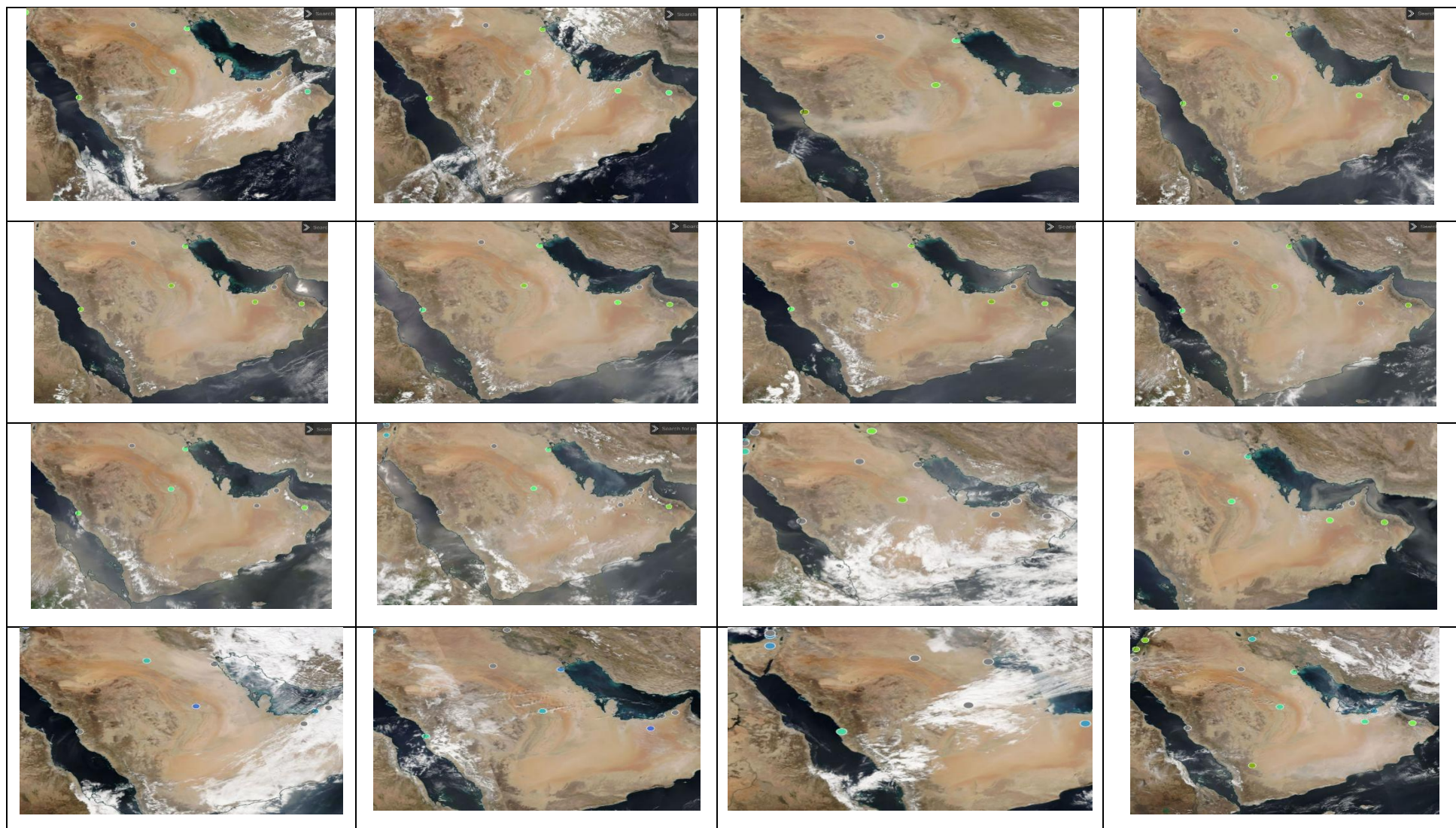
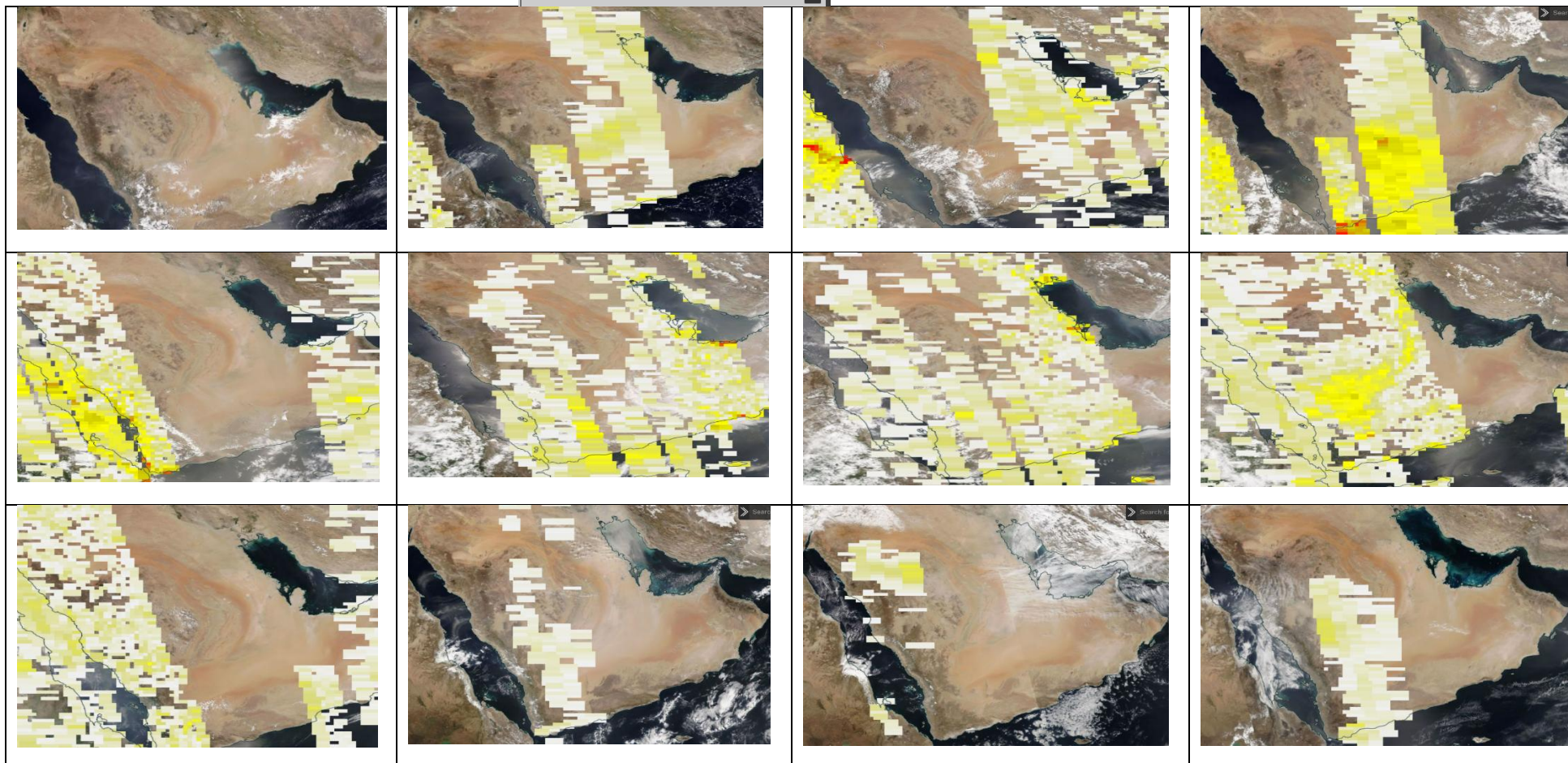
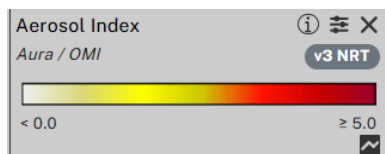


рис А.1 - Карты пространственного распределения параметра Ангстрема Aeronet (440–870 нм), 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Единая цветовая шкала для всех карт:



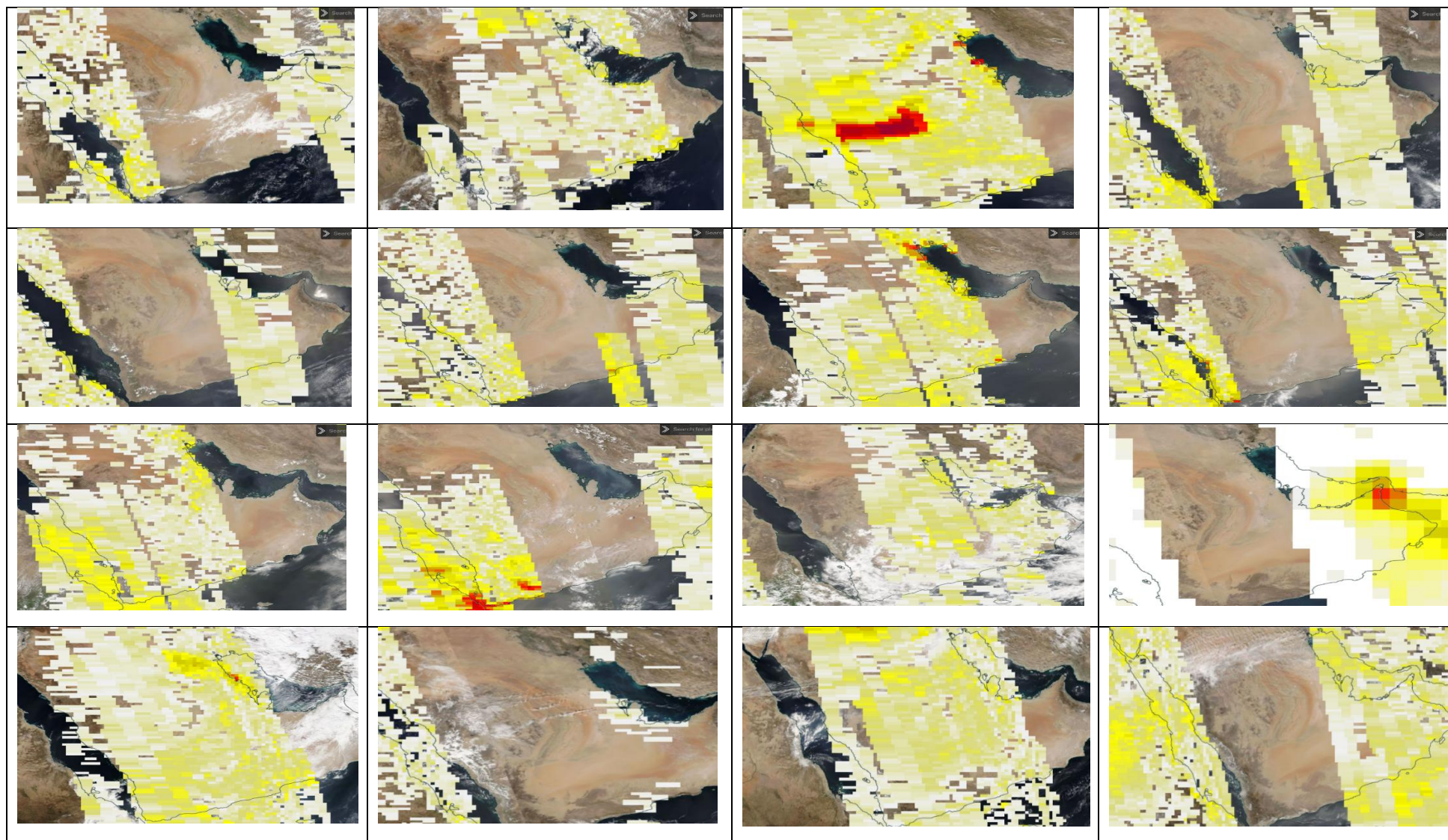
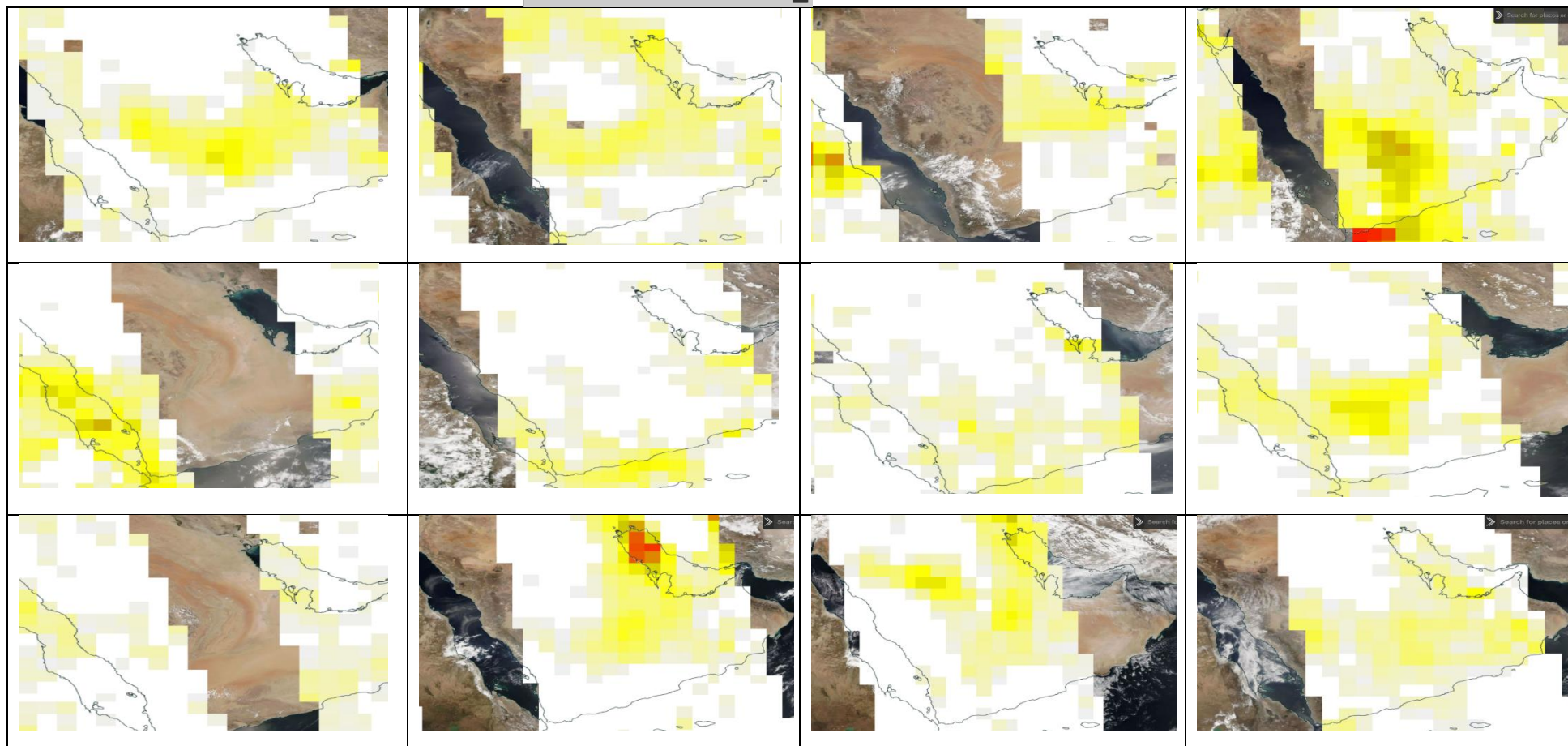
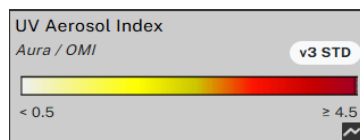


Рис Ё.1 - Карты аэрозольного индекса (AI) по данным OMI/Aura, 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Единая цветовая шкала для всех карт:



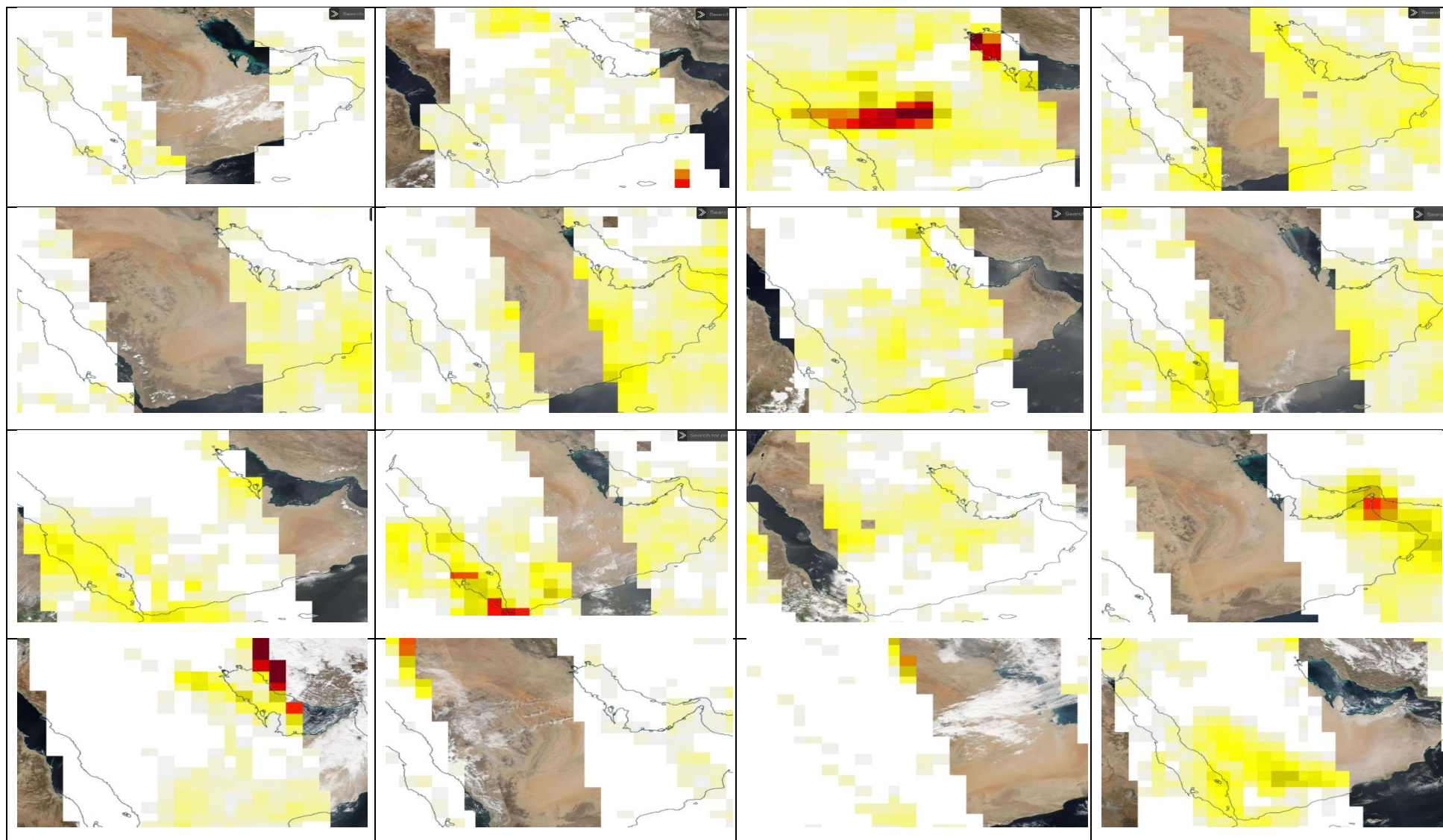
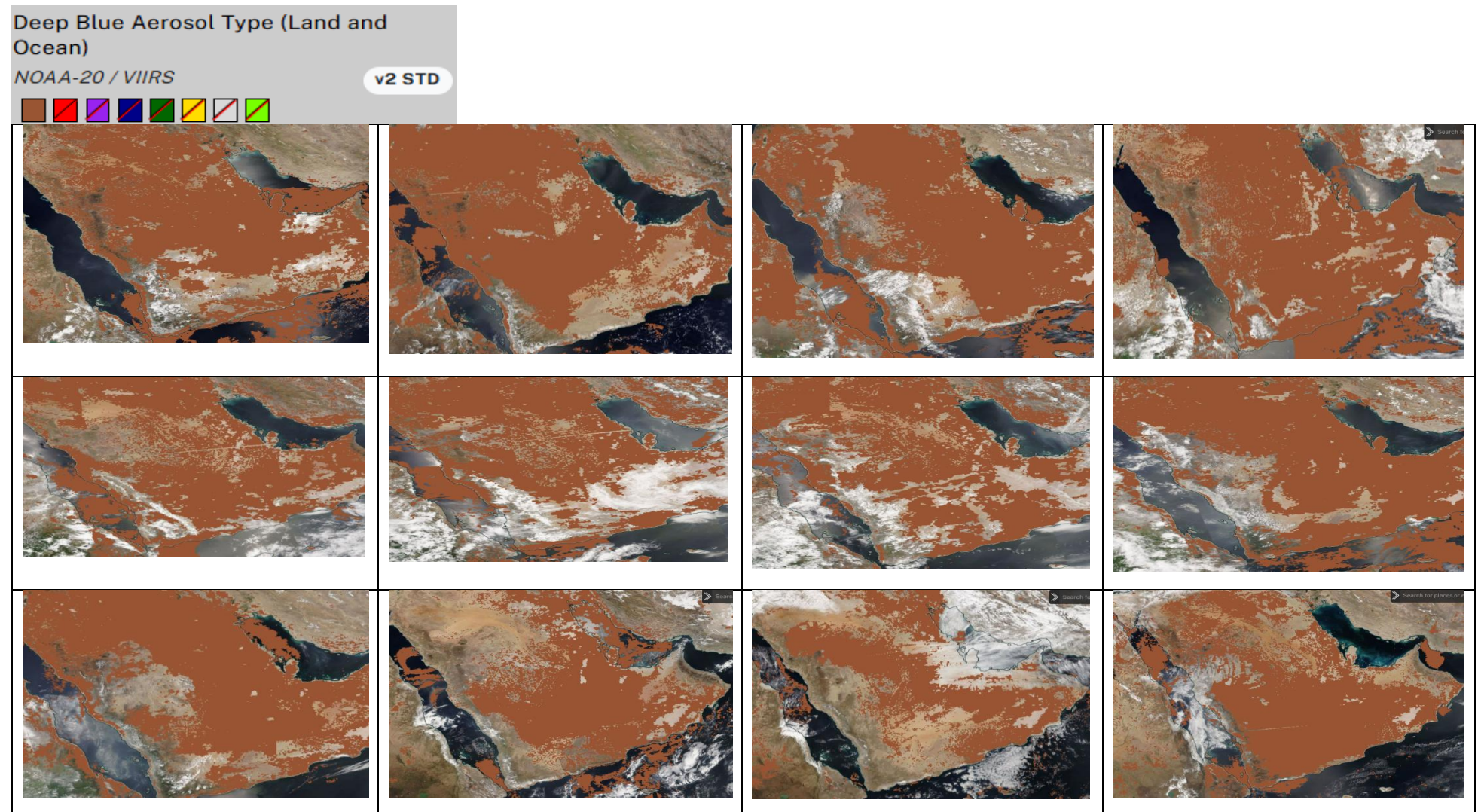


рис 3.1 - Карты ультрафиолетового аэрозольного индекса (UVAI) по данным OMI/Aura, 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ И



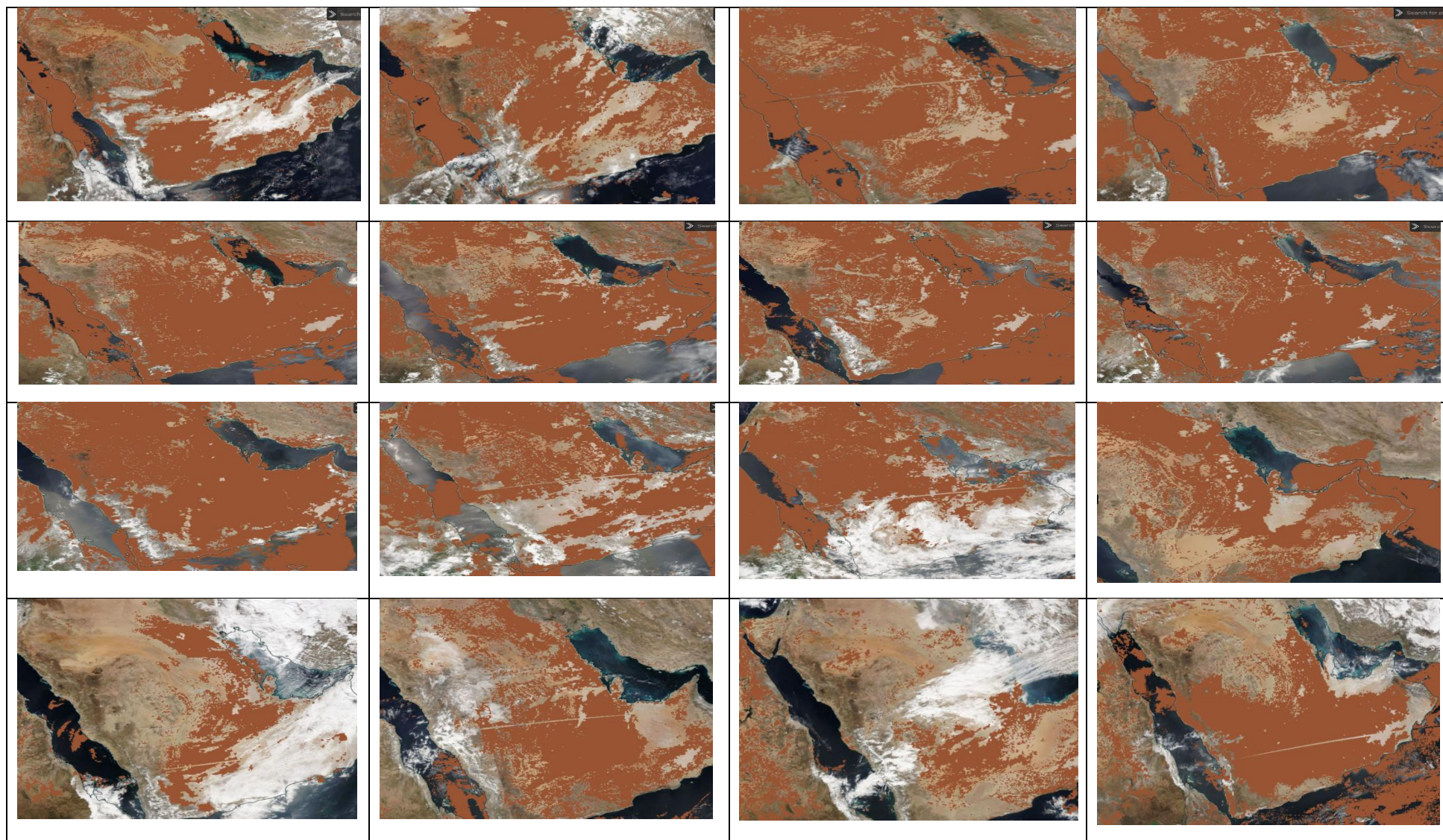
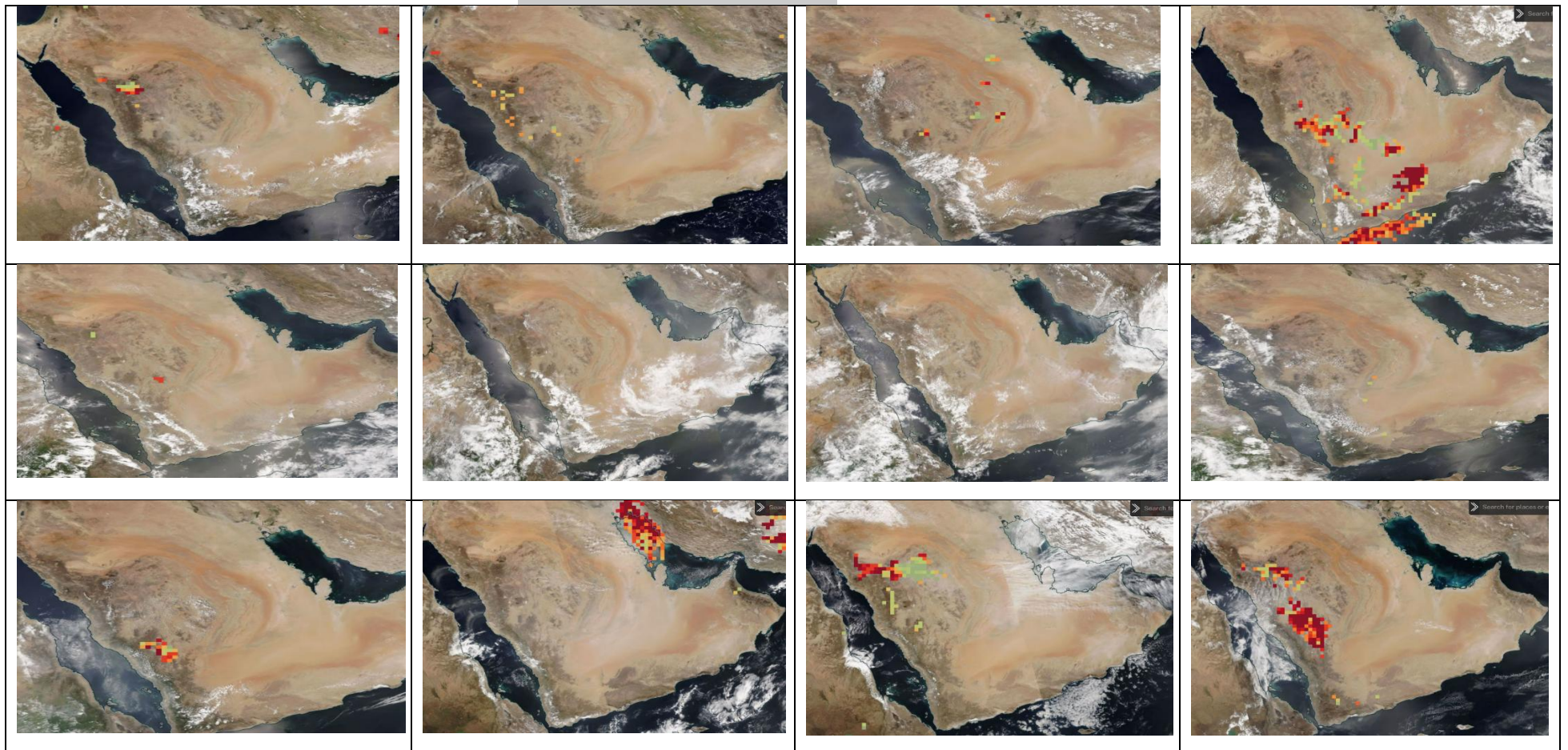
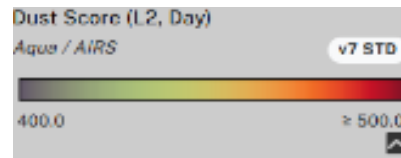


рис И.1 - Карта типов аэрозолей по данным NOAA-20/VIIRS, 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Единая цветовая шкала для всех карт:



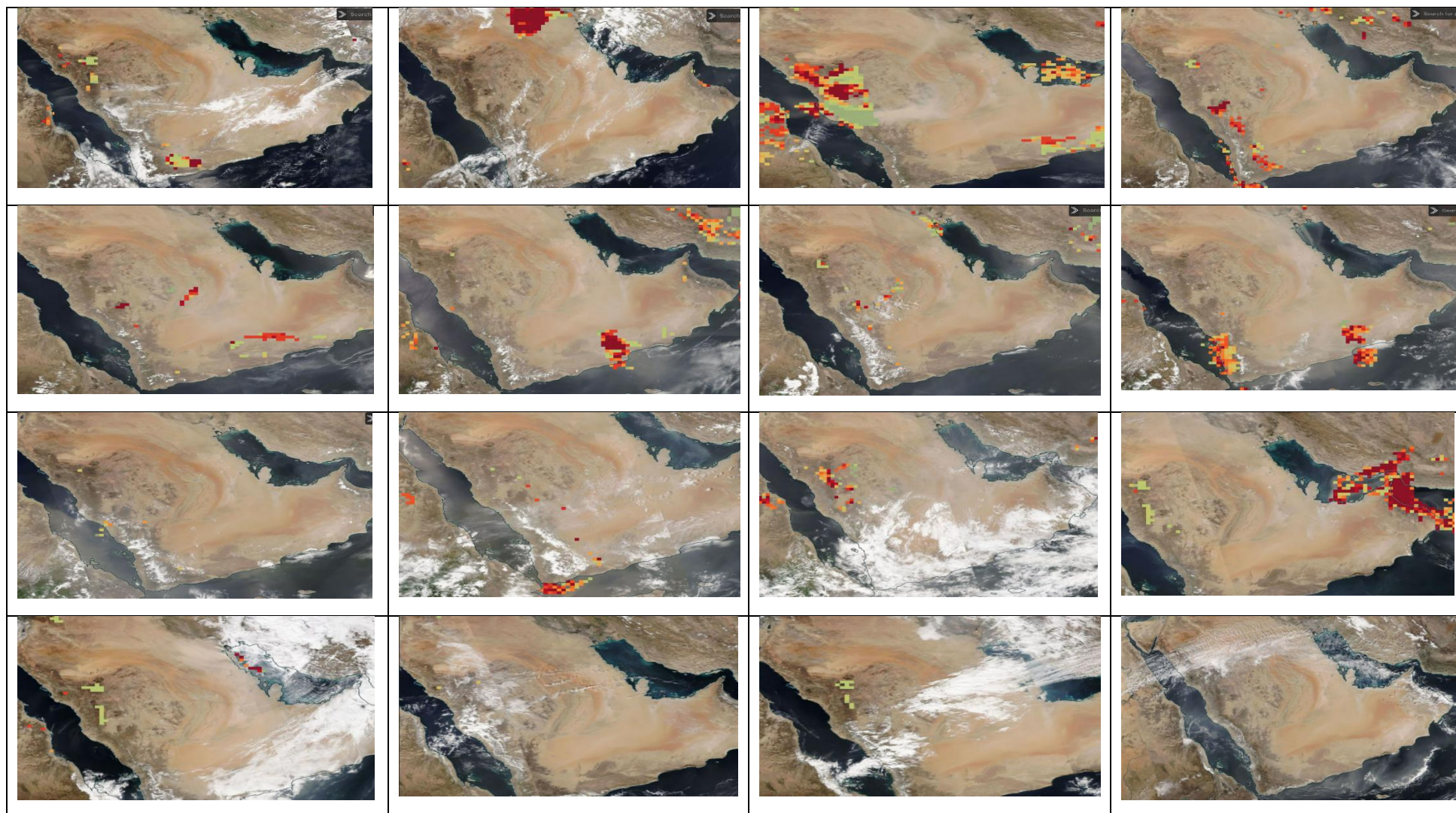
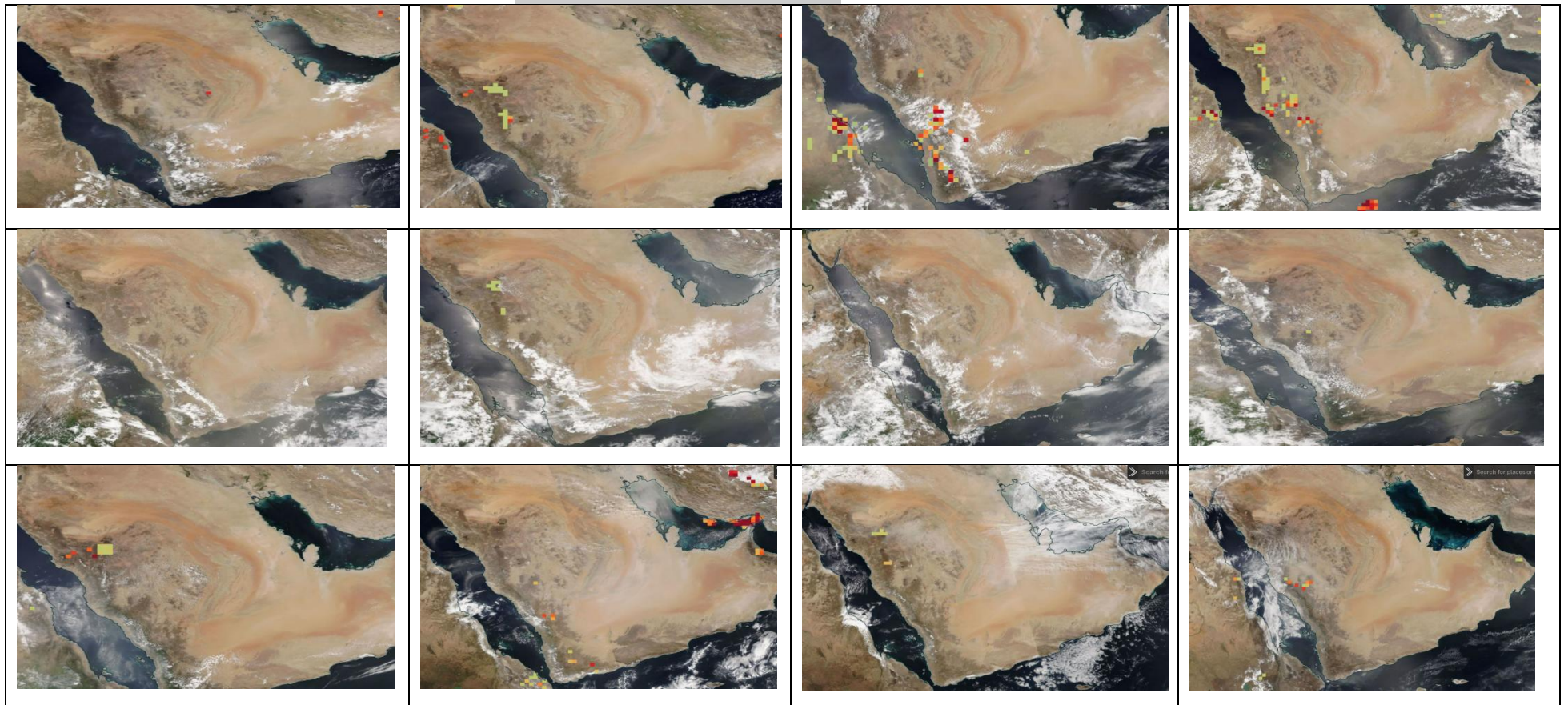
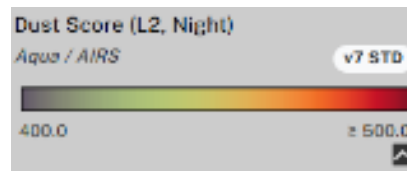


рис К.1 - Карты индекса запылённости (Dust Score, дневные наблюдения) по данным AIRS/AQUA, 2024–2026 гг.

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Единая цветовая шкала для всех карт:



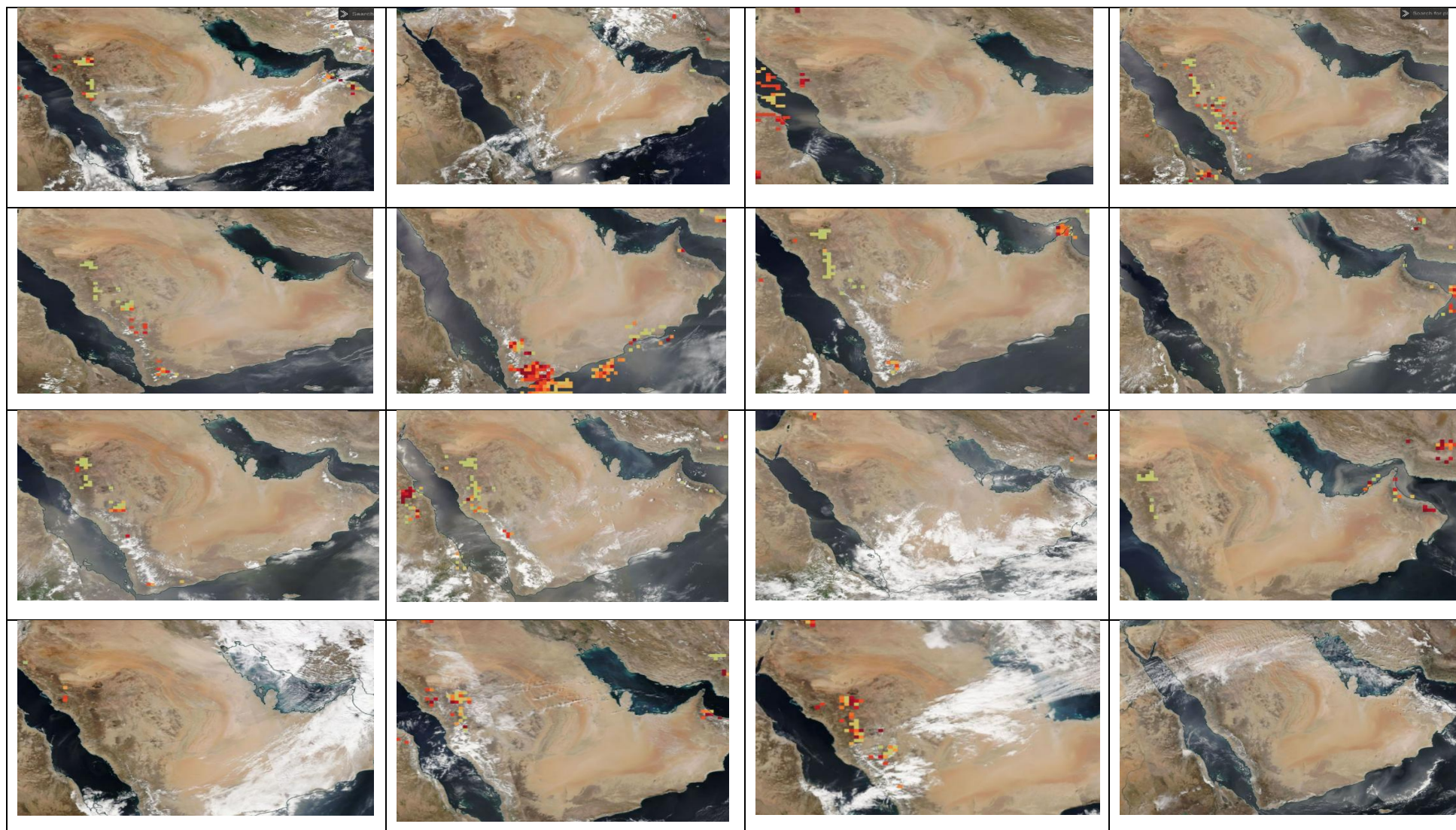


рис Л.1 - Карты индекса запылённости (Dust Score, ночные наблюдения) по данным AIRS/AQUA, 2024–2026 гг.