

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН»

На правах рукописи

КАЛИНСКАЯ ДАРЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА БИООПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ
И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 1.6.17. океанология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Суслин Вячеслав Владимирович

Севастополь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ	17
1.1 Основные оптические характеристики атмосферного аэрозоля и методы их определения.....	17
1.1.1 Аэрозольная оптическая толщина.....	17
1.1.2 Параметр Ангстрема.....	19
1.1.3 Функция распределения частиц по размерам.....	20
1.2 Характерные типы атмосферного аэрозоля над Чёрным морем и методы их идентификации.....	22
1.2.1 Фоновый аэрозоль.....	22
1.2.2 Пылевой аэрозоль.....	23
1.2.3 Дымовой аэрозоль (сажа).....	26
1.3 Инструменты и исходные данные для определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля.....	27
1.3.1 Данные сети AERONET.....	27
1.3.2 Прямые фотометрические измерения SPM.....	28
1.4 Дополнительные источники данных для определения оптических характеристик аэрозоля.....	29
1.4.1 Спутниковая информация об атмосферном аэрозоле по данным CALIPSO...29	
1.4.2 Спутниковые данные сканеров цвета.....	30
1.4.3 Система EOSDIS.....	32
1.4.4 Программный комплекс модели SILAM.....	34
1.4.5 Система FIRMS.....	35
1.4.6 Программный комплекс модели HYSPLIT.....	37
1.4.7 Программный комплекс модели AERONET.....	37
Выводы к главе 1.....	39

ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЁХ ТИПОВ АЭРОЗОЛЕЙ НАД ЧЁРНЫМ МОРЕМ.....	41
2.1 Методика определения источников приземного аэрозоля по данным моделирования.....	41
2.2 Статистика определения источников приземного аэрозоля по сезонам и географическому положению по данным моделирования.....	45
2.3 Оптические характеристики трёх типов аэрозоля над Чёрным морем.....	61
2.3.1 Оптические характеристики черноморского аэрозоля	61
2.3.2 Оптические характеристики фонового аэрозоля.....	67
2.3.3 Оптические характеристики и состав микроэлементов пылевого аэрозоля, количественный и качественный состав содержания в нем биогенных веществ.....	68
2.3.4 Оптические характеристики и состав микроэлементов дымового аэрозоля (сажа), количественное и качественное содержание в нем биогенных веществ....	77
Выводы к главе 2.....	86
ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ НА БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЧЁРНОГО МОРЯ.....	88
3.1 Влияние пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря с использованием только спутниковых данных.....	88
3.1.1 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря за 2010 год.....	88
3.1.2 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря за 2016 год.....	93
3.1.3 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря за 2018 год.....	97
3.2 Влияние пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря по спутниковым данным и <i>in situ</i> измерениям.....	104
Выводы к главе 3.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Аэрозольная компонента атмосферы влияет на многие физико-химические процессы на поверхности Земли [Лившиц, 1973; Мак-Картни, 1979; Кондратьев, 1983; Смеркалов, 1997; Голобокова, 2009]. В ходе циклического обмена между системами «океан – атмосфера» и «суша – атмосфера» взвеси поступают в атмосферу и удаляются из неё вместе с сухими и влажными осадками [Добровольский, 2009; Кондратьев, 2004; Шевченко и др., 2007]. Атмосфера является одним из путей транспортировки различных природных и антропогенных веществ в океаны, моря и внутренние водоемы [Duce, et al., 1991; Jickells, 1995]. Из атмосферного аэрозоля может происходить интенсивное осаждение микроэлементов в водоемы, что создает благоприятные условия для повышения биопродуктивности моря [Migon, Sandroni, 1999; Griffin, Kellogg, 2004; Middleton, Kang, 2017; Вареник и др., 2019; Орехова, 2021]. Так аэрозоль может быть источником питательных веществ, стимулирующих рост фитопланктона [Вареник, и др., 2016; Баранов, и др., 2020; Кульчин, и др., 2020; Werdell, et al., 2019]. Важным является определение типа содержащегося в атмосфере аэрозоля, так как от этого зависит какие биогенные вещества могут попасть в верхний слой водоёма в результате процесса осаждения и каков будет отклик экосистемы [Pulido-Villena, et al., 2008; Фишер, 1968].

Изучение взаимодействия атмосферного аэрозоля с прямым и рассеянным солнечным излучением является традиционной и развивающейся задачей оптики аэрозолей и физики атмосферы [Розенберг, 1942; Розенберг, 1965; Розенберг, и др., 1965; Розенберг, 1982; Сушкевич, 1966; Ивлев, Андреев, 1986; Толкаченко, и др., 2012; Суетин, и др., 2018]. Важным представляется исследование временной изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы – одного из основных факторов, характеризующих рассеивающий и поглощающий эффекты солнечной радиации в атмосфере [Иванов, 1979; Кондратьев и др., 1983; Зуев и др., 1986; Dubovik, et al., 2002; Суковатов, 2009; Сакерин и др. 2004; Сакерин и др. 2006; Сакерин и др. 2012]. Актуальной проблемой дистанционного зондирования Земли

считается получение корректной оценки вклада аэрозольной составляющей в суммарную яркость над внутренними водоемами [Suetin, et al., 2008; Копелевич, и др., 2018; Копелевич, и др., 2020].

Систематические наблюдения за спектральной прозрачностью атмосферы над Черным морем активно проводились в период с 1967 по 1977 г. на основе измерений спектрального ослабления солнечного света на метеорологической обсерватории в Карадаге вблизи Феодосии [Гущин, 1988]. К этому времени уже имелись некоторые сведения о характере колебаний прозрачности атмосферы и их связи с суточным ритмом и вариациями метеорологических полей (влажностью, температурой, радиацией и др.), возникающими вследствие вращения Земли [Гущин, 1988; Яковлева, Толкаченко, 2008]. Новый этап исследований атмосферы над Черным морем начался с конца 90-х годов XX в., когда были запущены специализированные спутники (SeaWiFS, MODIS, VIIRS, OLCI и др.) и появилась сеть автоматизированных фотометров AERONET. Для Черного моря влияние атмосферного аэрозоля на его биооптические характеристики до сих пор является слабоизученным вопросом. Результаты настоящего исследования в определенной степени восполняют этот пробел.

Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является оценка влияния различных типов атмосферных аэрозолей на пространственно-временное распределение биооптических характеристик верхнего слоя вод Чёрного моря.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1) Определить основные оптические характеристики (АОТ, α и распределение частиц по размерам) фонового, пылевого и дымового аэрозоля по фотометрическим измерениям.

2) Для определения географического положения источников аэрозоля для акватории Черного моря разработать способ интерпретации данных об обратных траекториях переноса воздушных потоков.

3) Используя данные натурных наблюдений установить связь между переносом пылевого и дымового аэрозоля и концентрацией содержащихся в них микроэлементов.

4) Оценить изменчивость биооптических характеристик верхнего слоя вод в зависимости от особенностей осаждения пылевого и дымового аэрозоля на основе данных спутниковых измерений и результатов численных расчетов.

Методология и методы исследования

Основным методологическим подходом выполненного диссертационного исследования является комплексный анализ данных различных источников, включающий в себя:

- результаты натурных измерений фотометрами CIMEL-318 и SPM;
- спутниковые измерения приборами MODIS, VIIRS, OLCI, CALIPSO;
- результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных потоков по данным моделирования AERONET и HYSPLIT;
- результаты сопоставления данных по атмосферным осадкам, содержащим повышенные концентрации микроэлементов, с данными оптических характеристик аэрозоля над черноморским регионом и поверхностного слоя вод;
- подспутниковые экспедиционные измерения на станциях международной сети AERONET, с борта НИС «Профессор Водяницкий», на океанографической платформе ФГБУН ФИЦ МГИ и береговой зоне Черноморского побережья фотометром SPM.

В процессе исследований использовались статистические методы обработки данных и стандартные пакеты обработки спутниковых изображений.

Научная новизна полученных результатов

Впервые получены основные оптические характеристики фонового, пылевого и дымового аэрозоля над Черным морем по натурным измерениям, проведенным фотометрами CIMEL-318 (сеть станций AERONET) и SPM в Севастополе, на ЮБК, на океанографической платформе в поселке Качивели и с борта НИС «Профессор Водяницкий».

Впервые разработан алгоритм определения источников переносимого аэрозоля для региона Черного моря на основе интерпретации результатов моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по данным AERONET и HYSPLIT.

Впервые получены оценки количества случаев переноса пылевого аэрозоля из районов Сахары и Ближнего Востока в регион Чёрного моря на основе предложенного алгоритма интерпретации результатов моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по данным AERONET и HYSPLIT.

Впервые показано влияние присутствия пылевого аэрозоля на результаты определения основных оптических характеристик поверхностного слоя вод Черного моря по данным различных спутников.

Впервые получена оценка временного сдвига отклика экосистемы открытой части Чёрного моря на осаждение на поверхностный слой вод фосфатов (PO_4^{3-}), силикатов (SiO_3^{2-}) и неорганических форм азота (NO_2 , NO_3 , NH_4), содержащихся в аэрозоле.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты, приведенные в работе соискателя, уточняют представление о влиянии аэрозоля на определяемые дистанционными методами величины аэрозольной оптической толщины, значения параметра Ангстрема и распределение частиц по размерам, а также на величины оптических характеристик поверхностного слоя Черного моря, такие как коэффициент яркости моря, концентрация хлорофилла-а и температура. В диссертации сделан дальнейший шаг в понимании влияния аэрозоля на интенсивность цветения фитопланктона и биопродуктивность верхнего слоя вод, а именно показано, что выпадение пылевого аэрозоля приводит к временному росту концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря и, как следствие, к росту показателя поглощения фитопланктона.

Результаты натурных измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля совместно с анализом проб, собранных осадкосборником в пгт. Кацивели, позволяют определить биогенные вещества, которые влияют на процессы, происходящие в поверхностном слое вод моря.

Полученные данные могут быть использованы для более точной параметризации основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля при моделировании биогеохимических процессов, происходящих в поверхностном слое Чёрного моря.

Положения, выносимые на защиту:

1) Для регионов акватории Черного моря приведены оптические характеристики пылевого и дымового аэрозоля (величины значений аэрозольной оптической толщины (AOT), параметра Ангстрема (α), распределение частиц по размерам).

2) Алгоритм определения источников пылевого и дымового аэрозоля по результатам статистического анализа событий переноса пыли в регион Черного моря по данным моделирования AERONET и HYSPLIT.

3) Результаты корреляционного анализа между оптическими характеристиками пылевого и дымового аэрозоля и количественным и качественным составом микроэлементов в атмосферных осадках, которые содержат высокие концентрации фосфатов, силикатов и азота.

4) Оценка изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя вод Черного моря под влиянием биогенных веществ (PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_2 , NO_3 , NH_4), осажденных из пылевого аэрозоля по данным наземных и спутниковых измерений.

Степень достоверности результатов проведенных исследований определяется следующими факторами.

— использованием методов и методик, являющихся общепринятыми в области исследования атмосферы, оптики и биогеохимии моря, при проведении измерений в сертифицированной лаборатории;

— обеспечением повышения точности измерений оптических свойств атмосферного аэрозоля за счет калибровки солнечных фотометров сети AERONET и SPM и валидации их измерений по спутниковым наблюдениям;

— анализом статистически обеспеченного массива данных натурных фотометрических измерений аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и распределения частиц по размерам;

- валидацией спутниковых данных и моделей первичной продукции и проверкой их соответствия *in situ* измерениям;
- публикацией в ведущих профильных рецензируемых российских и международных журналах.

Связь с научными программами, планами, темами

Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Морского Гидрофизического Института НАН Украины (2005–2014) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (2014–2022), а также в рамках научно-исследовательских проектов РФФИ (№14-45-01049, №16-35-00179, №17-05-00113, №19-05-00140, №19-05-50023).

Апробация результатов исследования

Основные результаты настоящей диссертации были представлены на заседаниях Ученого совета Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН (ИО РАН), Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН и ФГБУН ФИЦ МГИ. Основные результаты диссертации представлялись на международных и всероссийских конференциях, семинарах и школах: Международная молодежная научная конференция «Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины» (Крым, пгт Кацивели, 2007 г.); Международная научная конференция студентов и аспирантов «География, Геоэкология, Геология: опыт научных исследований» (г. Днепропетровск, ДНУ, 2007 г.); VIII Харьковская конференция молодых учёных «Радиофизика и Электроника, Биофизика» (г. Харьков, 2008 г.); 12 Международная конференция «Математические методы в электромагнитной теории» (г. Одесса, 2008 г.); Всеукраинская конференция «Аеро-космічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (г. Киев, 2008 г.); IV–X Международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод (Optics of natural waters)» (г. Санкт-Петербург, 2007–2019 гг., 2024 г.); Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (г. Севастополь, 2013 г.); IX Всероссийская научная

конференция молодых ученых «Понт Эвксинский» (г. Севастополь, 2015 г.); Первая всероссийская молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (г. Севастополь, 2016 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», (г. Москва, 2017 г., г. Санкт-Петербург, 2018 г., г. Севастополь, 2019 г.); Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2016 и 2018 гг., г. Иркутск, 2017 г., г. Новосибирск, 2019 г., г. Санкт-Петербург, 2024 г.); XII Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2016 г.); Научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология», (г. Севастополь, 2016 г.); Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2016–2019 гг.); Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», (г. Томск, 2016, 2018 гг.); XXV Международная техническая конференция «Прикладные задачи математики» (г. Севастополь, 2017 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 76 научных работ, из них 20 статей в рецензируемых научных журналах, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 55 работ в сборниках научных трудов, материалов и тезисов докладов на всероссийских и международных научных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 16 работ в рецензируемых научных изданиях [1–16] и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [17]. В их числе 9 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [8–16], 11 работ в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [6–16], 3 работы [2, 3, 5] в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные резуль-

таты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и 2 работы [1, 4] в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №-723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Статьи в рецензируемых журналах:

1. **Калинская, Д.В.** Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем / **Д.В. Калинская** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – №. 26 (2). – С. 151-162.

2. Толкаченко, Г.А. Оценка пространственных масштабов аэрозольной атмосферы над акваторией Черного моря / Г.А. Толкаченко, **Д.В. Калинская**, А.В. Смирнов, Ю.А. Прохоренко // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5. – №. 4. – С. 69-79.

3. **Калинская, Д.В.** Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий / **Д.В. Калинская**, В.В. Суслин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8, №. 1. – С. 59-67.

4. Суслин, В.В. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В.В. Суслин, В.Х. Слабакова, **Д.В. Калинская**, С.Ф. Пряхина, Н.И. Головкин // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №. 1 (187). – С. 20-32.

5. **Калинская, Д.В.** Результаты измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в черноморском регионе (2015–2016) / **Д.В. Калинская**, Д.М. Кабанов, А.А. Латушкин, С.М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, №. 6. – С. 489-496. DOI: 10.15372/AOO20170607.

6. **Калинская, Д.В.** Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над черноморским регионом / **Д.В. Калинская**, А.В. Вареник, А.С. Папкина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, №. 3. – С. 217-225. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225. (**Kalinskaya D.V.** Phosphorus and Silicon as Markers of Dust Aerosol Transfer over the Black Sea Region / **D.V. Kalinskaya**, A.V. Varenik, A.S. Papkova // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2018. – 15(3). – P. 217–225).

7. **Калинская, Д.В.** Исследование характеристик аэрозолей над Чёрным морем посредством системы FIRMS во время пожаров за период 2007–2018 гг. / **Д.В. Калинская**, Д.А. Рябokonь // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, №. 4. – С. 247-255. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-247-255. (**Kalinskaya D.V.** A Study of Aerosol Characteristics over the Black Sea by the FIRMS System during Forest Fires in 2007–2018 / **D.V. Kalinskaya**, D.A. Ryabokon // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2019. – 16(4). – P. 247–255).

8. **Калинская, Д.В.** Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018–2019 годы / **Д.В. Калинская**, А.С. Папкина, Д.М. Кабанов // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36, №. 5 (215). – С. 559-570. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-559-570. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Research of the Aerosol Optical and Microphysical Characteristics of the Atmosphere over the Black Sea Region by the FIRMS System during the Forest Fires in 2018–2019 / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova, D.M. Kabanov // *Physical Oceanography*. – 2020. – V. 27, #. 5. – P. 514-524. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-514-524).

9. Вареник, А.В. Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным / А.В. Вареник, **Д.В. Калинская**, М.А. Мыслина // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37, №. 3 (219). – С. 350-361. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-350-361. (Перевод: Varenik A.V. Investigation of Airborne Particulate Matter in the Atmosphere of the Black

Sea Coastal Zone Based on the Measured and Satellite Data / A.V. Varenik, **D.V. Kalinskaya**, M.A. Myslina // Physical Oceanography. – 2021. – V. 28, # 3. – P. 326-337. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-326-337).

10. **Калинская, Д.В.** Влияние атмосферного переноса взвешенных частиц PM_{10} на оптические характеристики поверхностного слоя Черного моря / **Д.В. Калинская**, О.Б. Кудинов // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 2(385). – С. 107-111. DOI: 10.15372/AOO20210205. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Influence of Atmospheric Transport of Suspended PM_{10} Particles on the Optical Characteristics of the Surface Layer of the Black Sea / **D.V. Kalinskaya**, O.B. Kudinov // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2021. – V. 34, # 3 – P. 205-211. DOI: 10.1134/S1024856021030076).

11. Varenik, A.V. The Effect of Dust Transport on the Concentration of Chlorophyll-a in the Surface Layer of the Black Sea / A.V. Varenik, **D.V. Kalinskaya** // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – V. 11, # 10. – P. 4692. DOI: 10.3390/app11104692.

12. Korchemkina, E.N. Algorithm of Additional Correction of Level 2 Remote Sensing Reflectance Data Using Modelling of the Optical Properties of the Black Sea Waters / E.N. Korchemkina, **D.V. Kalinskaya** // Remote Sensing. – 2022. – V. 14, # 4. – 831. DOI: 10.3390/rs14040831.

13. **Kalinskaya, D.V.** Why Is It Important to Consider Dust Aerosol in the Sevastopol and Black Sea Region during Remote Sensing Tasks? A Case Study / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova // Remote Sensing. – 2022. – V. 14, # 8. – 1890. DOI: 10.3390/rs14081890.

14. Калинская, Д.В. Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года / Д.В. Калинская // Морской гидрофизический журнал. – 2022. – Т. 38, № 3 (225). – С. 324-340. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-3-324-340. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021 / **D.V. Kalinskaya** // Physical Oceanography. – 2022. – V. 29, # 3. – P. 303-319. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-303-319).

15. **Калинская, Д.В.** Изменчивость коэффициента яркости в условиях пылевого переноса по данным спутника Sentinel-3 на примере Черного моря и Севастополя / **Д.В. Калинская**, А.С. Папкина // Морской гидрофизический журнал. – 2023. – Т. 39, № 3(231). – С. 399-415. DOI: 10.29039/0233-7584-2023-3-399-415. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Variability of the Water-Leaving Radiance under Conditions of Dust Transport by the Sentinel-3 Satellite Data on the Example of the Black Sea and Sevastopol / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova // Physical Oceanography. – 2023. – V. 30, # 3. – С. 369- 383. DOI: 10.29039/1573-160X-2023-3-369-383).

16. Папкина, А.С. Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета / А.С. Папкина, Е.Б. Шибанов, **Д.В. Калинская** // Морской гидрофизический журнал. – 2024. – Т. 40, № 5(239). – С. 766-781. EDN: WUXIXB. (Перевод: Papkova A.S. The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners / A.S. Papkova, E.B. Shybanov, **D.V. Kalinskaya** // Physical Oceanography. – 2024. – V. 31, #5. – P. 720-735. EDN: AKOILG).

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

17. Кудинов, О.Б. Свидетельство Российской Федерации № 2022667490 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для реализации методики определения источников приземного аэрозоля на основе результатов данных моделей «AERONET» и «HYSPLIT» / О.Б. Кудинов, **Д.В. Калинская**. Заявитель и правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2022 г. – EDN RJWRFW.

Личный вклад соискателя

Планирование, анализ и обсуждение результатов исследовательской работы проводились соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Диссертантом лично выполнены натурные измерения ослабления прямого солнечного излучения портативным фотометром SPM. По полученным спутниковым и модельным данным, а также по измерениям фотометров CIMEL-318 и SPM

сети AERONET для региона Черного моря определены оптические характеристики фонового, пылевого и дымового аэрозоля над Черным морем.

Соискателем проведено сопоставление оптических характеристик аэрозоля с величинами концентраций биогенных веществ в пробах атмосферных осадков, отобранных Вареник А.В. в период переносов над Черным морем пыли со стороны пустынь и дыма от пожаров.

Д.В. Калинской совместно с научным руководителем представлен алгоритм интерпретации результатов моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков, находящихся в открытом доступе на платформах AERONET (Архив AERONET <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/BAMGOMAS/index.html>) и HYSPLIT (Архив HYSPLIT <https://www.ready.noaa.gov/index.php>), для определения географического положения источников аэрозоля на примере Черного моря. По представленному алгоритму соискателем было вычислено количество случаев переноса пылевого аэрозоля из районов Сахары и Сирии в регион Черного моря, что позволило определить периоды наибольшего влияния пыли на оптические свойства вод, определяемых методами дистанционного зондирования.

Совместно с соавторами для открытой части Черного моря диссертантом выполнены оценки временного сдвига отклика экосистемы на осаждение биогенных веществ, содержащихся в пылевом аэрозоле.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю – кандидату физико-математических наук, заведующему отделом динамики океанических процессов Суслину Вячеславу Владимировичу за внимательное руководство работой, за помощь и полезные идеи, соавторство в статьях по теме диссертации, советы и комментарии в течение всего периода написания работы. Особая благодарность доктору физико-математических наук, профессору, заведующему отделом оптики и биофизики моря Ли Михаилу Ен-Гон и доктору физико-математических наук Шибанову Евгению Борисовичу. Автор благодарит кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела оптики и биофизики моря Корчемкину Елену Николаевну за совместные измерения и определение оптических

характеристик для акватории Черного моря. Соискатель выражает благодарность коллегам из Лаборатории оптики аэрозоля Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, а именно: доктору физико-математических наук, главному научному сотруднику Сакерину Сергею Михайловичу и кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику Кабанову Дмитрию Михайловичу за предоставление аппаратуры и соавторство в статьях по измерениям, осуществляемым посредством фотометра SPM. Диссертант благодарит кандидата географических наук, старшего научного сотрудника отдела биогеохимии моря Вареник Аллу Валерьевну за помощь в исследованиях с использованием геохимических данных проб осадков и оперативную их обработку. Автор благодарит своих коллег: коллектив отдела оптики и биофизики моря за помощь в исследованиях и проведении натурных измерений. Соискатель благодарит Тома Кушера (Tom Kucsera), Брента Холбена (Brent Holben) и группу Жене Фельдмана (Gene Feldman) из НАСА за предоставление спутниковых измерений и расчёты перемещения обратных потоков ВТА (Back Trajectory Analyses), а также обработку полученных на севастопольской станции AERONET данных.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованных источников. Объем работы составляет 140 страницы, содержит 40 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список включает в себя 185 наименований, в том числе 80 на английском языке.

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

1.1 Основные оптические характеристики атмосферного аэрозоля и методы их определения

1.1.1 Аэрозольная оптическая толщина. Полную информацию о свойствах аэрозоля можно получить при комплексном исследовании и определении концентрации, микроструктуры и химического состава, а также оптических характеристик, таких как АОТ (аэрозольная оптическая толщина), альбедо однократного рассеяния, показателя преломления и индикатрисы рассеяния. Тип атмосферного аэрозоля можно определить по нескольким оптическим характеристикам, которые связаны с химическим составом, распределением частиц по размерам и другими свойствами аэрозоля. Однако универсальная классификация типов аэрозоля по оптическим характеристикам не существует из-за разнообразия видов частиц в атмосфере и физико-химических процессов их образования. В данной работе будут рассмотрены только три из них: аэрозольная оптическая толщина, показатель Ангстрема аэрозольной оптической толщины и функция распределения частиц по размерам. Выбор именно этого набора оптических характеристик обусловлен тем, что их получают по натурным, спутниковым и модельным данным как над регионом Черного моря, так и над большинством акваторий Мирового океана. Это дает возможность на основании изменчивости одновременно трех величин объективно оценить динамику и различные характеристики атмосферы над исследуемым регионом.

Одной из основных и актуальных задач оптики атмосферы является определение вертикальной оптической толщины τ . Данная величина определяется из закона ослабления света [Лившиц, 1973; Гущин, 1988; Смеркалов, 1997]: если в атмосфере выделить плоско-параллельный слой высотой dh , то поток прямого монохроматического солнечного излучения, зенитный угол которого Z_0 , можно записать в виде

$$F = F_0 e^{-\sec Z_0 \int_0^{h_0} k(h) dh} \quad (1.1)$$

где F – монохроматический поток, прошедший через атмосферу;

F_0 – поток, падающий на её верхнюю границу в вертикальном направлении (спектральная солнечная постоянная);

h_0 – высота атмосферы;

$k(h)$ – спектральный коэффициент ослабления, величина которого зависит от высоты h над земной поверхностью.

Коэффициент прозрачности атмосферы определяется как $p = e^{-\tau} = F/F_0$. С учётом этого формула (1.1) преобразовывается в

$$\ln F = \ln F_0 - \sec Z_0 \ln p \quad (1.2)$$

После выполнения измерений приходящего потока F при различных зенитных углах Солнца Z_0 , производятся расчёты по формуле (1.2) вплоть до достаточно больших зенитных углов Солнца (порядка $Z_0 \leq 75 \div 78^\circ$). Однако в случае $Z_0 > 75 \div 78^\circ$ вместо $\sec Z_0$ используется атмосферная масса m (или функция Бемпорада) [Пясковская-Фесенкова, 1957], которая позволяет в определённой мере учесть влияние сферичности Земли не только для прямого, но и для рассеянного света.

Оптическая толщина τ учитывает компоненты рассеяния τ_p и поглощения τ_n , каждый из которых разделяется на молекулярную и аэрозольную составляющие [Калинская, 2012; Толкаченко и др., 2012]

$$\tau = \tau_p + \tau_n = \tau_{a.p} + \tau_{m.p} + \tau_{a.n} + \tau_{m.n}. \quad (1.3)$$

Явление молекулярного (рэлеевского) рассеяния в однородном слое атмосферы изучено очень подробно – оптическая толщина $\tau_{m.p.}$ вычисляется по формуле Рэлея

$$\tau_{м.р} = \frac{8\pi^3(n^2-1)h}{3N\lambda^4} \cdot \frac{p}{p_0}, \quad (1.4)$$

где N – число молекул в единице объёма;

n – показатель преломления воздуха над уровнем моря;

λ – длина волны света;

h – высота однородного слоя атмосферы;

p/p_0 – отношение давления воздуха в данной точке к нормальному давлению.

Молекулярное поглощение связано с ослаблением энергии оптических волн за счет поглощения атмосферными газами. Основным поглощающим газом в атмосфере является водяной пар. Однако следует учитывать влияния таких газов, как O_3 , CO_2 и NO_2 . Поглощение атмосферными газами отличается высокой спектральной селективностью. В видимой области спектра основную роль играет озон, слабые и широкие полосы поглощения (полосы Шапюи) которого расположены около 600 нм [Лившиц, 1973; Зуев и др., 1986; Калинская, 2022; Шибанов, и др., 2022].

1.1.2 Параметр Ангстрема. Показатель или параметр Ангстрема (α) [Angstrom, 1929] название показателя степени в формуле зависимости оптической толщины аэрозоля от длины волны [Калинская, 2012; Толкаченко и др., 2012]

$$\tau_a(\lambda)/\tau_a(\lambda_0) = (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}, \quad (1.5)$$

где $\tau_a(\lambda)$ – оптическая толщина на длине волны λ ; λ_0 – стандартная (опорная) длина волны.

При анализе параметра Ангстрема выбирают различные сочетания длин волн. В нашей работе проводился анализ параметра ангстрема на длинах волн 440 нм и 870 нм, соответственно параметр Ангстрема $\alpha(440/870)$.

1.1.3 Функция распределения частиц по размерам. Распределение аэрозольных частиц по размерам определяется функцией $\chi(r)$, для которой выполняются условия: величина $\chi(r)dr$ – это число частиц с радиусом в пределах $(r, r+dr)$, $\chi(r) > 0$ для всех $r \in [r_1, r_2]$ и $\int_{r_1}^{r_2} \chi(r)dr = N$, где N – численная концентрация частиц. Функция распределения частиц по размерам может описываться либо аналитически – классическими распределениями или их комбинациями, а также теоретическими функциями (полученными на основе определённых физических представлений о закономерностях образования и трансформации аэрозолей) либо эмпирическими функциями, подбираемыми в соответствии с конкретными экспериментальными данными [Мак-Картни, 1979; Ивлев, 1982; Зуев и др., 1986; Калинская, 2012; Толкаченко и др., 2012; Калинская, Суслин, 2016]. Другими словами, это функция, которая характеризует количество (в нашем случае аэрозольных) частиц данного размера, входящих в единичный объем атмосферного воздуха.

Основным методом определения размеров частиц является определение величины радиуса или диаметра сферических частиц, которые имеют площадь сечения, равную площади сечения реальных аэрозольных частиц [Роул, 2009]. Этот метод обусловлен тем, что большинство аэрозольных частиц в атмосфере имеют неправильную форму, однако не сильно отличающуюся от сферической. Частицы аэрозоля взвешены в воздухе, но они не ориентированы гравитационным и электромагнитным полями [Автомонов и др., 2010; Донченко и др., 2010; Сушко, 2001; Сушко, 2003].

Диапазон размеров частиц атмосферного аэрозоля определяется частицами, объемы которых колеблются от нескольких молекул до гигантских частиц и могут достигать 10^5 мкм. Такой разброс обусловлен процессами образования частиц и взаимодействия их между собой. Верхний предел размеров определяет период существования этих частиц в атмосфере. В литературе [Ивлев, 1982; Макарова и др., 1991; Williams, et al., 1991; Тимофеев и др., 2003; Суковатов, 2009] выделяют три группы (фракции) аэрозольных частиц:

1) ультрамикроскопическую или мелкодисперсную (ядра Айткена) с эффективными радиусами частиц $r \leq 0,1$ (от $10^{-3} \div 10^{-2}$) мкм. Эта фракция играет важную роль в электрических атмосферных явлениях, а также в фотохимических процессах, происходящих в атмосфере. Концентрация таких частиц в одном кубическом сантиметре составляет $10^2 \div 10^4$;

2) субмикронную или среднедисперсную, включающую частицы в диапазоне размеров $0,1 \text{ мкм} < r < 1 \text{ мкм}$. Эта фракция в основном и определяет оптические свойства атмосферного аэрозоля, в частности, обуславливает как рассеяние, так и поглощение солнечной радиации [Сидоров, 1999]. Концентрация таких частиц в одном кубическом сантиметре составляет $10 \div 10^3$;

3) грубодисперсную или крупнодисперсную, с размерами частиц $r \geq 1$ ($1 \div 10$) мкм. Такие частицы участвуют в процессах облакообразования и влияют на оптические свойства атмосферы. Концентрация таких частиц в одном кубическом сантиметре составляет $100 \div 10$. Частиц с радиусом более 10 мкм в дымке, в отличие от тумана, несоизмеримо мало, а, соответственно, зачастую ими пренебрегают.

В настоящее время широко исследуются различные аэрозольные фракции, т.е. распределение аэрозольных частиц в зависимости от их размера. Крупнодисперсная фракция (0,6 – 10 мкм) попадает в диапазон около нулевых величин показателей Ангстрема. Сложнее обстоит дело с субмикронной фракцией аэрозоля (0,1 – 0,6 мкм), поскольку параметр Ангстрема будет варьироваться при сдвиге максимума функции распределения по размерам внутри этого интервала [Калинская, 2022; Шибанов и др., 2022].

Информацию о распределении частиц по размерам в сети AERONET получают по результатам измерения индикатрисы рассеяния в альмукантарате Солнца. При низких высотах Солнца (большие зенитные углы) перекрывается максимальный угловой интервал, однако при этом возникает больше ошибок, обусловленных необходимостью учёта многократного рассеяния, сферичности геометрии наблю-

дения, неоднородности атмосферы по горизонтали (и горизонтали вследствие сферичности). Индикатриса рассеяния аэрозоля один из важнейших параметров, необходимый для расчета рассеяния света в атмосфере [Калинская, 2012].

1.2 Характерные типы атмосферного аэрозоля над Чёрным морем и методы их идентификации

1.2.1 Фоновый аэрозоль. Разнообразие видов частиц, находящихся в земной атмосфере, их ярко выраженная пространственно-временная изменчивость, обусловленная как метеорологическими, так и географическими факторами, большое число физико-химических процессов образования частиц и их трансформации определяют известные сложности при попытке создания универсальной классификации типов атмосферного аэрозоля. В зависимости от задач и объектов исследования в их основу могут быть положены различные классифицирующие признаки. Первый из них – источники и механизмы образования аэрозолей в атмосфере. Основными источниками частиц являются поверхности морей, океанов и суши, извержения вулканов, жизнедеятельность растений, лесные и степные пожары, метеоритные потоки, химические и фотохимические реакции в атмосфере и растительном покрове, а также источники, связанные с антропогенным фактором жизнедеятельности человека. Специфика Чёрного моря состоит в том, что его можно считать внутренним морем, т. е. водным объектом, окружённым со всех сторон сушей. Появление атмосферных аэрозолей происходит либо в результате поступления в атмосферу готовых частиц из так называемых первичных источников, либо же они образуются непосредственно (*in-situ*) в атмосфере в результате сложных физико-химических превращений газ-частица, т.е. из вторичных источников.

Из всего разнообразия различных типов аэрозоля в этой работе будут рассмотрены только три, наиболее типичных, из них: фоновый, пылевой и дымовой.

По результатам исследований получены многочисленные данные, позволяющие определить генезис аэрозоля в атмосфере над океаном и выявить закономерности пространственного распределения его концентрации [Klett, 1981; Ansmann et al., 2005; Muller et al., 2007; Omar, 2005; Omar, 2007; Omar, 2009; Sayer, 2012; Smirnov, 2003; Mielonen et al., 2009; Vaughan et al., 2009]. Океан, занимая 2/3 поверхности Земли, является мощным, постоянно действующим источником, генерирующим аэрозоль в атмосфере.

Океанический (морской) аэрозоль образуется из морской воды, однако его химический состав сильно отличается от химического состава морской воды. Основной причиной этого факта являются особенности химического состава поверхностного микрослоя воды [Кудрявцев и др., 1999; Zhang et al., 1998; Zhang et al., 2003].

Для каждого исследуемого региона определяют фоновые характеристики атмосферного аэрозоля, относительно которых можно выявить аномальные ситуации аэрозольного воздействия. Фоновый аэрозоль состоит преимущественно из субмикронных фракций минеральной пыли и других континентальных (главным образом сульфатных) аэрозолей, проникших через облачный фильтр в верхнюю тропосферу выше 2 – 3 км над океанами и 5 км над континентами, где этот аэрозоль распределён сравнительно равномерно с концентрацией числа частиц около 300 см^{-3} при стандартных температуре и давлении [Монин, 1982]. В нашем случае это типичный аэрозоль морского происхождения.

1.2.2 Пылевой аэрозоль. В работах [Емельянов, Кооль, 1979; Лисицын, 2011; Лисицын, 2014] выделяют зоны аридной седиментации, т.е. зоны, характеристики которых обусловлены особенностями климата, подготовкой рассеянного аэрозольного вещества на суше, его транспортировкой ветром на разных высотных уровнях и отложением на поверхность Мирового океана. Эти зоны являются основным источником поступления в атмосферу [Калинская, 2012, Калинская и др., 2018,

Kalinskaya, Parkova, 2022], а затем отложения в морях и океанах наибольшего количества нерастворимых частиц. По своему размеру это в основном микро- и наночастицы (94% по массе мельче 2 мкм) [Лисицын, 2011].

Аэрозольные частицы, образованные на поверхности земли под воздействием возникновения и перемещения пылевой бури, в большинстве случаев нерастворимы в воде (например, состоящие из кремния). В отличие от морской соли форма этих частиц не зависит от влажности. Несмотря на это, в условиях избыточной влажности минеральные ядра могут покрываться водной пленкой или ледяной коркой (обледеневать), что может влиять на изменчивость оптических свойств образовавшихся в результате этих процессов частиц. У таких частиц показатели преломления будут ниже, чем у тех же частиц до процесса образования водной плёнки или обледенения [Kokhanovsky, 2008]. Резко возрастающая во время пылевого шторма концентрация минеральных частиц приводит к интенсивному оседанию органики и сажи на этих ядрах, что изменяет морфологию частиц, резко увеличивает поглощение и меняет спектральный ход АОТ.

В работах [Емельянов, Кооль, 1979; Лисицын, 2011; Лисицын, 2014; Varenik, Kalinskaya, 2021] выделяют зоны аридной седиментации, т.е. зоны, характеристики которых обусловлены особенностями климата, подготовкой рассеянного аэрозольного вещества на суше, его транспортировкой ветром на разных высотных уровнях и отложением на поверхность Мирового океана. Эти зоны являются основным источником поступления в атмосферу, а затем отложения в морях и океанах наибольшего количества нерастворимых частиц. Эти источники определяются географическими областями захвата аэрозолей, последующего его переноса и отложения в океане. Одним из таких источников является Северная Африка (пустыня Сахара и полупустынный район Сахель). Аэрозоль из этого источника переносится в основном на север (Средиземное и Чёрное моря, и Европа) [Калинская, 2012].

Пылевой аэрозоль, содержащий частицы почвы, может переноситься на тысячи километров и оседать на подстилающую поверхность в процессе выпадения осадков. Кремний является одним из крупнейших компонентов почвенного мине-

рального аэрозоля. В поверхностных водах многих прибрежных районов это особенно проявляется в изменениях концентраций кремния, азота и фосфора [Rabalais, et al., 1996; Guieu et al., 1997; Guieu et al., 2010]. Так меняется и стехиометрия биогенных элементов в Черном море. В [Yunev, et al., 2017] показано, что в таких условиях соотношение Si к N на шельфе Дуная уменьшилось на порядок, что создало неблагоприятные условия для развития диатомовых. В работе [Tréguer, et al., 1995] считают, что около 10 Tmol (280 Tg) взвешенного Si достигает поверхности океана за счет переноса эоловой пыли, из которых по их примерным оценкам около 5–10 % растворяются в морской воде. Таким образом, транспортировка почвенной пыли в атмосферу является эффективным средством перераспределения Si в окружающей среде. Учитывая недостаток кремния в Черном море атмосферное поступление этого биогенного элемента с пылью и атмосферными осадками может оказать и положительный эффект на развитие фитопланктона.

Как показано в работе [Gallissai, et al., 2012] связь между годовыми циклами хлорофилла-а и осаждением частиц аридного происхождения может в среднем объяснить 11,5 % вариации хлорофилла-а в значительной части Средиземного моря. При этом анализ модели SeaWIFS и BSC-DREAM 8b за восемь лет (2000 – 2007 гг.) показывает, что осаждение минеральной пыли пустынь Северной Африки и Ближнего Востока коррелирует с концентрацией хлорофилла-а в довольно больших районах Средиземного моря. Положительная корреляция между осаждением пылевого аэрозоля и концентрацией хлорофилла-а была обнаружена в больших районах Средиземного моря с четким градиентом снижения коэффициента корреляции с юга на север [Gallissai, et al., 2016]. Концентрация хлорофилла-а значительно возрастала после интенсивного осаждения частиц минеральной пыли, демонстрирующего пики концентрации между 1-м и 6-м днями после этого события, причём прирост хлорофилла-а колебался от 13 % до 345 % для различных случаев.

Эти результаты подчеркивают важность исследования осаждения частиц пыли африканского и ближневосточного происхождения в процессе потенциальной стимуляции производства фитопланктона в истощенных питательными веществами поверхностных слоях Средиземного моря.

Эффекты влияния пыли пустыни Сахара на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря будут рассмотрены в главе 3.

1.2.3 Дымовой аэрозоль (сажа). Концентрация аэрозольных частиц дыма (дымового аэрозоля) зависит в первую очередь от интенсивности их образования и от времени (длительности) существования и нахождения в атмосфере [Кондратьев и др., 1983; Dubovik et al., 2002; Гришина, 2006; Донченко, 2010]. Время жизни частиц зависит как от их размеров и высоты атмосферного слоя, в который они первоначально введены, так и от других физико-химических свойств аэрозоля.

В приземном слое частицы, радиус которых превышает 10 мкм, осаждаются на земную поверхность через несколько часов после поступления в атмосферу. Частицы субмикронного размера обладают высокой подвижностью и в результате интенсивного броуновского движения и коагуляции достаточно быстро укрупняются, образуя «тонкую моду» частиц. Время существования этой моды аэрозольных частиц достаточно велико [Ивлев, 1982; Eck et al., 2018].

Представителями эффективно поглощающих излучение аэрозолей являются частицы сажи. Сажа природного происхождения – важный компонент тропосферного и стратосферного аэрозоля – присутствует даже в Арктическом регионе [Шевченко и др., 2009]. Частицы сажи демонстрируют сильное поглощение излучения в тонком фронтальном поверхностном слое. Однако это характерно только для достаточно крупных частиц [Reed, 1977; Летфулова и др., 2001].

Размеры частиц пепла в основном превышают 1 мкм и, следовательно, их время жизни в атмосфере относительно невелико [Shkinev et al., 2016]. В химическом составе пепла присутствуют тяжёлые металлы, благодаря которым он имеет особые каталитические и фотокаталитические свойства.

Так как севернее Чёрного моря расположены обширные степные пространства, то в период весны после схода снежного покрова часто возникают пожары с разной степенью интенсивности, генерирующие дымовой аэрозоль, который как показано будет ниже появляется над акваторией моря [Калинская, 2023]. С юго-

западного направления в период засушливого лета горят лесные массивы в Турции и Греции, что также приводит к появлению данного типа аэрозоля над Чёрным морем.

1.3 Инструменты и исходные данные

1.3.1 Данные сети AERONET. Одним из наиболее эффективных средств исследования характеристик атмосферного аэрозоля является глобальная сеть наблюдательных автоматизированных станций AERONET (Aerosol ROboties NETwork) [Holben, et al., 1998; Smirnov, et al., 2000; Dubovik, et al., 2000]. AERONET в настоящее время является одной из сетей наземного мониторинга атмосферы, данными которой пользуются ученые всего мира. В ее состав входят более 180 станций, расположенных в различных точках земного шара, наблюдения на которых проводятся с одинаковой точностью. Преимуществом этой сети является использование однотипных автоматических фотометров и стандартизированных процедур калибровки и обработки полученных данных. На всех станциях как правило установлены однотипные многоканальные автоматические солнечные фотометры Cimel-318 (CE-318) производства фирмы CIMEL Electronique (Франция). Станции, оснащённые такими фотометрами, функционируют в течение относительно длительного периода времени (от года до нескольких десятков лет).

К работам по международной программе AERONET Морской Гидрофизический Институт приступил в мае 2006 г. и с этого времени по 2015 г. в Севастополе осуществлялся непрерывный мониторинг оптических характеристик атмосферного аэрозоля посредством фотометров Cimel. Солнечный фотометр установлен на крыше главного корпуса института. Координаты станции Sevastopol N 44°36' 56", E 33°31'02", высота над уровнем моря 80 м.

На сайте программы AERONET доступны данные трех уровней обработки level 1.0, level 1.5 и level 2.0 (уровни 1.0; 1.5; 2.0).

Фотометр CE-318 функционирует в автоматическом режиме, для последующего корректного определения характеристик аэрозолей проводится отбор измерений, исключая те результаты, которые могут оказаться искажёнными,

например, наличием облаков на небосводе. Априори предполагается, что у функции распределения аэрозоля по размерам имеется две моды с характерными величинами положений максимумов и внутримодовых дисперсий.

Кроме того, на сайте системы аэрозольного мониторинга международной сети AERONET, в рамках которой проводятся спектральные фотометрические измерения оптических характеристик атмосферы по всему земному шару для каждой станции сети доступны обратные траектории движения воздушных потоков [Dubovik, King, 2000; Dubovik, et al., 2002; Поддубный, Наговицына, 2013].

1.3.2 Прямые фотометрические измерения SPM. Портативный солнечный фотометр SPM (Sun photometer mobile) представляет прибор для измерений спектральной прозрачности в «окнах прозрачности» атмосферы и полосе поглощения водяного пара (0,94 мкм). Определение искомых характеристик атмосферы основывается на методе «прозрачности» – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, и дифференциальной методике. При нормальных условиях эксплуатации и калибровки погрешность определения АОТ составляет 0,01–0,02, влагосодержания атмосферы 0,1 г/см². Описание методик калибровки и расчета искомых характеристик приведено в работах [Кабанов и др., 1995; Кабанов и др., 1997; Сакерин и др., 2004; Кабанов и др., 2009].

Фотометр SPM, внешний вид которого представлен на Рисунке 1.1, предназначен для измерений спектральной прозрачности атмосферы с целью последующего определения АОТ и общего влагосодержания (ОВС) атмосферы.

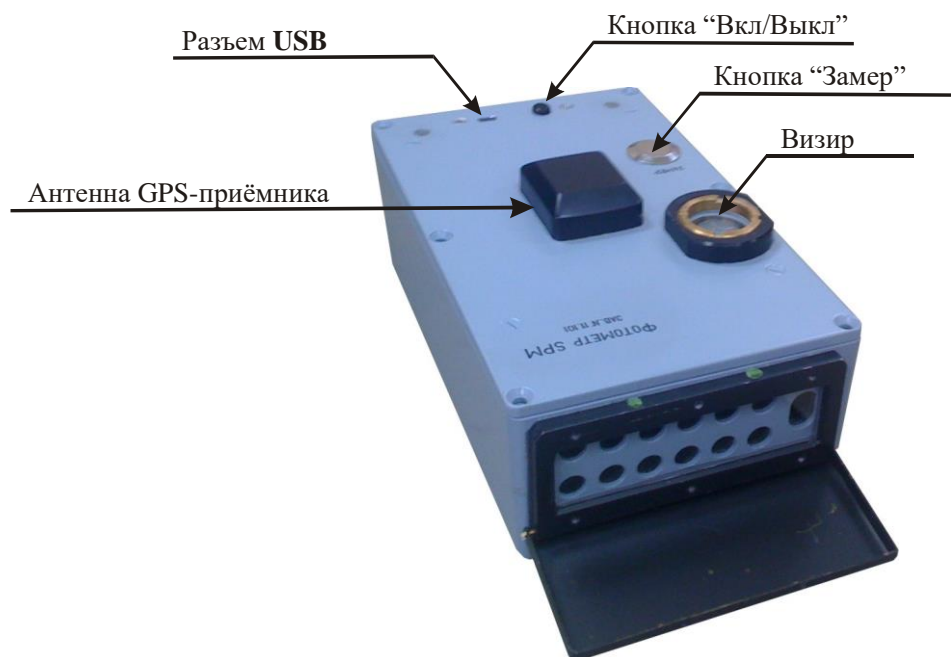


Рисунок 1.1 – Внешний вид портативного фотометра SPM
[Сакерин и др., 2012; Калинская и др., 2017]

Процесс измерений автоматизирован – результаты измерений спектральной солнечной радиации (вместе с координатами, временем замеров, давлением и температурой) накапливаются в цифровом виде во flash-памяти прибора и затем через USB порт передаются на персональный компьютер для обработки – расчета AOT и OBC.

1.4 Дополнительные источники данных для определения оптических характеристик аэрозоля

1.4.1 Спутниковая информация об атмосферном аэрозоле по данным CALIPSO. CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) – американо-французский исследовательский спутник, запущенный в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System) и предназначенный для изучения облачного покрова Земли [Man-HaeKim, et al., 2018; Mielonen, et al., 2009].

Основной целью CALIPSO является проведение глобальных измерений аэрозолей и облаков. Алгоритм CALIPSO по измеренному коэффициенту деполяризации ($\delta\nu$) классифицирует аэрозоль по типам: $\delta\nu \in [0,025 - 0,05]$ – чистый морской аэрозоль, $\delta\nu \in [0,05 - 0,15]$ – частицы загрязненной пыли или смога, $\delta\nu \in [0,15 - 0,5]$ – с большой вероятностью пылевой аэрозоль [Vaughan, et al., 2009; Omar, et al., 2005; Omar, et al., 2007; Omar, et al., 2009; Калинская, Папкова, 2017].

За исключением чистого морского и загрязненного континентального аэрозоля все типы аэрозолей находятся в основном пространственном разрешении 80 км. Почти 80% смогов и 60% загрязненного пылевого аэрозоля находятся над водой, в то время как чистая пыль встречается как на суше, так и на воде на сопоставимых частотах.

1.4.2 Спутниковые данные сканеров цвета. Одной из компонент, которые измеряют спутниковые сканеры цвета MODIS/Aqua, VIIRS, Sentinel/OLCI является спектральная величина яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_t), которая дополнительно включает рассеянное аэрозольными частицами и молекулами воздуха излучение и френелевское отражение от границы вода-воздух, а также излучение, вышедшее из верхнего слоя моря.

По мере усложнения задачи дистанционного зондирования моря все больше внимания уделяется аэрозольной компоненте. Комбинированные данные MODIS (Terra и Aqua) [Vermote, et al., 2002] – это спутниковые данные аэрозольных продуктов MODIS Aerosol Optical Depth (AOD) уровня 2. Благодаря этому типу спутниковой информации можно получить точное синоптическое представление об уровне аэрозоля в атмосфере. Спутниковые данные уровня 3 предоставляют количественную информацию. Эти данные используются при прогнозировании аэрозольных воздействий в различных моделях.

Данные аэрозольной оптической толщины MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) – это величина поглощения и рассеяния

взвешенными аэрозольными частицами во всем столбе атмосферы [Lyapustin, Wang, 2007]. Для определения пространственно-временных особенностей АОТ для Черноморского региона применены именно данные спутникового алгоритма MAIAC [Калинская, 2022], т.к. они имеют высокое пространственное разрешение и доступны за период измерений радиометра MODIS. По сравнению с другими аэрозольными продуктами MODIS, сравнительный анализ данных АОТ, полученных с помощью алгоритма MAIAC, и данных Черноморских станций сети AERONET показал, что данные алгоритма MAIAC имеют меньшие расхождения с данными наземных измерений [Lyapustin, Wang, 2007]. В настоящее время MAIAC является единственным алгоритмом, который предоставляет высококачественную информацию об аэрозолях с пространственным разрешением 1 км, включая мелкие масштабы городских загрязнений, дыма от активных пожаров (включая и небольшие локальные пожары) и пыльные бури. Специализированное обнаружение дыма и пыли посредством MAIAC помогает фиксировать и точно типизировать аэрозоли для большинства активных пожаров, которые часто распознаются как облака в стандартных рабочих алгоритмах атмосферной коррекции. Благодаря хорошей точности на всех типах подстилающей поверхности, включая яркие снежные и городские поверхности, MAIAC АОТ широко используется для контроля качества воздуха во всем мире. Благодаря высокому пространственному разрешению и надежному обнаружению облачности MAIAC предоставляет данные в условиях частичной облачности, когда стандартные продукты с грубым разрешением не могут обеспечивать достоверную информацию об оптических характеристиках атмосферного слоя. АОТ по данным MODIS и MAIAC – это комбинированный сигнал спутников Terra и Aqua, информация о котором предоставляется в близком к реальному времени [Lyapustin, Wang, 2007; Краснощёков, Якубайлик, 2020; Калинская, 2022].

Событие переноса пылевого аэрозоля может быть проанализировано по спутниковым данным MODIS Aqua, а именно по пылевой загрузке или значениям параметра ADS (AIRS Dust Score), вычисленным на основе результатов зондирования

атмосферы в инфракрасном и микроволновом диапазонах. По данным MODIS пылевая загрузка атмосферы над исследуемым регионом определяется из нескольких тестов, которые сравнивают значения спектральной яркости излучения в отдельных каналах для одного и того же пикселя спутникового изображения. Атмосферный инфракрасный зонд (AIRS) – это прибор на борту второй полярно-орбитальной платформы системы наблюдения за Землей EOS Aqua. В сочетании с усовершенствованным устройством микроволнового зондирования (AMSU) AIRS представляет собой инновационную группу датчиков видимого, инфракрасного и микроволнового диапазона для зондирования атмосферы.

1.4.3 Система EOSDIS. Система EOSDIS (Earth Observing System (EOS) Data and Information System) – первая международная система распределения баз космических данных, которая создана и функционирует в рамках экспериментального проекта по обмену каталогами (Catalog Interoperability Experiment – CINTEX). Одним из продуктов EOSDIS являются данные спектрального радиометра MODIS, а именно, данные по активным пожарам [Justice et al., 2002]. Они были первыми дистанционно обнаруженными объектами с разрешением ~ 1 км, которые могли быть проанализированы в сравнительном отношении с бортовыми наземными датчиками пожароопасной обстановки. С момента их создания в 2000 году данные о пожарах MODIS использованы для обоснования широкого круга научных вопросов относительно воздействия аэрозоля горящей биомассы на климат Земли [Chen, et al., 2013, Chuviesco, et al., 2008, Chu, et al., 2002], а также в многочисленных задачах оперативного мониторинга и дистанционного зондирования [Ichoku, et al., 2016; Glasius, et al., 2011; Калинская, Рябоконь, 2019].

На платформе EOSDIS представлены спутниковые изображения по слоям. Слой спутникового изображения, полученный с учетом параметра ADS, достоверно показывает наличие атмосферных аэрозолей в атмосфере Земли над океаном. Значение спектральной яркости, измеренное в чувствительных к пыликаналах, сравнивается со значением яркости, измеренным в каналах не чувствительных к

пыли. Если ADS выше $380 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$, то вероятность наличия в атмосфере пылевого аэрозоля близка к 100 %. Разница в значениях спектральной яркости между несколькими парами каналов маркируется в виде цветовых пикселей от жёлтого (минимум) до коричнево-оранжевого (максимум), что соответствует низким и высоким значениям концентрации пылевого аэрозоля. Пиксели с максимальной разницей значений спектральной яркости ($\text{ADS} > 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$) окрашиваются в коричневый цвет, что указывает на максимальную загрузку пылевым аэрозолем атмосферы над исследуемым регионом. Таким образом цветовые пиксели – это качественное представление присутствия пыли в атмосфере, а также указание на то, где могут образоваться крупные пылевые бури и какие районы могут быть ими затронуты. Пиксели, где ADS меньше $360 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$, не отображаются как пылевые. Пространственное разрешение спутникового изображения в псевдоцветах, на котором отображается пылевая загрузка, составляет 2 км.

По данным MODIS и VIIRS пожар детектируется при фиксировании температурной аномалии над исследуемой областью. Тепловые аномалии по данным спутникового зонда MODIS представляют собой центр пикселя размером 1 км, который помечен алгоритмом MOD14 / MYD14 Fire and Thermal Anomalies [Tansey, et al., 2008; Tansey et al., 2013]. Принцип детектирования пожаров основан на их сильном излучении в среднем ИК-диапазоне, получаемых в каналах 4 мкм и 11 мкм с пространственным разрешением 1 км. Обработка спутниковой информации является важным этапом для создания последовательных наборов данных для долгосрочного мониторинга как региональных, так и глобальных изменений климата. Как часть от EOS, большинство продуктов MODIS доработаны функциями, позволяющими периодически выполнять алгоритмические изменения и уточнения. Например, обновления под названием Collection 6, внесённые в алгоритм активного обнаружения пожаров и связанных с ними продуктов MOD14 (Terra) и MYD14 (Aqua), предоставляются в виде временных рядов спутниковых изображений MODIS. Алгоритм Collection 6 предназначен для решения проблем, связанных с

детектированием ложных сигналов, возникающих в результате неверного определения границ леса и земли без растительности, а также пропусков пожаров, заслоненных густым дымом [Ji, Stocker, 2003].

1.4.4 Программный комплекс модели SILAM. Загрязнение атмосферы рассчитывается с использованием модели SILAM (System for Integrated modeling of Atmospheric coMposition). Программный комплекс SILAM широко используется для изучения воздействия лесных пожаров, извержений вулканов, переноса пыли, а также других природных и техногенных катастроф на загрязнение атмосферы в целом. Схема расчета данного воздействия основана на модели Лагранжа – Эйлера. Система компьютерного моделирования рассеивания загрязняющих веществ SILAM, разработанная Финским метеорологическим институтом, представляет собой современный мощный инструмент для моделирования рассеивающих свойств аэрозолей, газовых составляющих, частиц пыли, радионуклидов и природных аллергенов в атмосфере. Дисперсные свойства аэрозольных частиц могут варьироваться в широком диапазоне. Система SILAM позволяет моделировать дисперсию многих химических соединений и их смесей с различными типами взаимодействия между ними. Еще один параметр – индекс качества воздуха (AQI), разработанный Агентством по охране окружающей среды. Значения выше 300 означают опасное качество воздуха, между 200 – 300 очень вредно для здоровья, 150 – 200 вредно для здоровья, 100 – 150 вредно для чувствительных групп, а ниже 100 или, скорее, ниже 50 качество воздуха хорошее. Терминология источников по модели SILAM включает определение точечных и обширных источников, таких как морская соль, пыль, природная пыльца, природные летучие органические соединения, а также интерфейсы к системе выбросов в акваториях от судов и данные систем о пожарах IS4FRIES.

Также модель SILAM предоставляет карты пространственного распределения концентрации озона на высоте 10 м над землёй (приземный озон). Озон (O_3) образуется в результате реакции солнечного света на входящие в состав воздуха химические элементы и соединения. Так содержащийся углеводород и оксиды

азота вступают в реакцию с образованием озона непосредственно в источнике загрязнения или на много километров с подветренной стороны [Калинская, 2021; Калинская, 2022; Калинская, Папкова, 2021; Калинская, Папкова, 2023].

1.4.5 Система FIRMS. Система FIRMS (Fire Information for Resource Management System) является частью EOS (LANCE). Данная система пожарной информации предоставляет активные данные о пожарах в режиме реального времени в течение 3 часов после прохождения спутников, как с помощью спектрорадиометра MODIS, так и с помощью спутникового зонда высокого пространственного разрешения VIIRS— 2-х полосного радиометра, работающего в УФ, ИК и видимом диапазоне (0,45 – 12 мкм).

Основной характеристикой системы FIRMS, по которой определяют интенсивность температурной аномалии (пожара) является параметр Fire Radiative Power (измеренная мощность излучения) – FRP. FRP(МВт) – это параметр, который определяет количество тепловой энергии, выделяемой за единицу времени при горении растительного покрова. В данной работе использована методика вычисления параметра FRP, позволяющего оценить интегральную радиационную мощность теплоизлучения от термически активной зоны. В работе [Wooster, et al, 2005] показана линейная связь FRP и интенсивности горения, а также получен эмпирический коэффициент пересчета энергии излучения в скорость сгорания биомассы:

В системе ежедневных наблюдений за пожарами FIRMS глобальный мониторинг пожаров производится с разрешением 1 км с помощью специальных спектральных каналов на длинах волн 4 и 11 мкм. Эти данные используются для мониторинга последствий пожаров, типа и состояния растительности, дымовых аэрозолей, водяного пара и облаков, воздействия пожаров на экосистемы, атмосферу и климат. Алгоритмы распознавания очагов возгорания используют тепловую сигнатуру для отделения сигнала пожара от фонового сигнала. База данных продуктов активного пожара создается и архивируется с разрешением 1 км и суммируется по сетке 10 км и 0,5° ежедневно, 8 дней и ежемесячно. Запись о пожаре включает в

себя возникновение и местоположение термоаномалии, скорость выделения тепловой энергии от огня и приблизительную оценку отношения тления/пламени.

Температуры активных пожаров сильно различаются. В работе [Ohlemiller, 1995] предложена температура 675 °K в качестве нижнего температурного предела тлеющей древесины, а в статье [Riggan, et al., 2004], предполагалось, что температура в зоне горения доходит до 1600 °K. Отдельный лесной пожар, вероятно, состоит из нескольких зон горения и тления с диапазоном температур, колеблющихся в небольших пространственных масштабах. FRP такого пожара (здесь выраженный на единицу площади наземного поля зрения) определяется законом Стефана-Больцмана, который может быть адаптирован к ситуации с несколькими тепловыми компонентами следующим образом

$$FRP = \varepsilon \sigma \sum_{k=1}^n p_k T_k^4 \quad (1.6)$$

где FRP – мощность излучения огня ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$);

n – количество компонентов температуры в огне;

σ = постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Дж с}^{-1} \text{ м}^{-2} \text{ К}^{-4}$);

ε – коэффициент излучения дыма от огня;

p_k – доля площади k -го теплового компонента поверхности в пределах поля зрения;

T_k – кинетическая температура k -го теплового компонента (°K).

Однако данное уравнение можно использовать для расчета FRP на основе измерений дистанционного зондирования, только если радиационные температуры отдельных компонентов пожара изменяются в пространственных масштабах, которые могут быть разрешены прибором (порядка миллиметров) [Gaydon, Wolfhard, 1970; Калинская, Рябоконь, 2019]. Кроме того, при наблюдении из космоса огонь в целом обычно намного меньше пикселя, так что радиационная яркостная темпера-

тура пикселя огня может быть значительно ниже, чем истинная радиационная температура огня. По этим причинам для субпиксельных пожаров требуются альтернативные методы получения FRP.

Чем больше значение параметра FRP, тем выше скорость сгорания биомассы. Соответственно большее количество горящей биомассы, попадая в атмосферу, может быть перенесено на большие расстояния от места возгорания [Калинская, Рябokonь, 2019].

1.4.6 Программный комплекс модели HYSPLIT. Модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) — это система для расчета траекторий воздушного потока, а также комплексного переноса, химического преобразования и моделирования осадков. Данная модель предоставляет траекторный анализ для любого географического объекта, используя два сценария событий. В первом сценарии исходные координаты представляют собой начало отсчёта перемещения воздушного потока на определенной высоте. Второй сценарий предполагает, что исходные координаты — это конечная точка регистрации переноса, поэтому используется понятие построения обратной траектории. Основная задача данной модели — определить координаты происхождения воздушных масс и установления отношений источник — рецептор [Калинская и др., 2017; Калинская, Рябokonь, 2019]. Данные HYSPLIT также используются в различных моделях, описывающих атмосферный перенос, диспергирование и осаждение загрязняющих веществ и опасных материалов.

1.4.7 Программный комплекс модели AERONET. Существует несколько программных комплексов для расчета обратных траекторий, получивших широкое распространение благодаря своей доступности и гибкости. Результаты моделирования представляют собой уже сформированные базы данных, содержащие информацию о динамике атмосферы. На сайте системы аэрозольного мониторинга международной сети AERONET, в рамках которой проводятся спектральные фотометрические измерения оптических характеристик атмосферы по всему земному шару

для каждой станции сети доступны обратные траектории движения воздушных потоков [Dubovik, King, 2000; Dubovik, et al., 2002; Поддубный, Наговицына, 2013; Калинская, 2012; Толкаченко и др., 2012; Калинская и др., 2017; Калинская, Рябонь, 2019].

Семидневные обратные траектории ВТА (Back trajectory analyzes) предоставляются для всех станций сети AERONET для каждого дня с начала работы соответствующей станции и выложены в открытом доступе онлайн.

Траектория движения воздушного потока представляет собой набор точек в пространстве, каждая из которых определяется координатами положения лагранжевой частицы в определенный момент времени. По способу отсчета времени вдоль траектории различают прямые и обратные траектории движения воздуха. Прямая траектория показывает путь, который проходит воздушная частица по мере ее отдаления от точки «старта» траектории. При определении обратной траектории используется отрицательный шаг по времени, т. е. траектория характеризует путь, который прошла воздушная частица до ее прихода в пункт мониторинга. За сутки восстанавливаются две обратные траектории, соответствующие приходу воздушных масс в 0 и в 12 часов по Гринвичу. Надежность информации о динамике атмосферы подтверждается множеством работ, посвященных оценкам точности модельных расчетов прямых и обратных траекторий движения воздушных частиц. Такие оценки выполняются на основе сравнения результатов моделирования с реальными траекториями, полученными в результате отслеживания передвижения специальных зондов [Дубинкина, 2015] или же маркеров. В качестве маркеров могут выступать различные примеси, выпущенные в ходе поставленного эксперимента (инертные газы) или попадающие в атмосферу в результате явлений природного (пыльца, вулканический пепел) и техногенного характера (радиоактивные вещества), а также физические величины (потенциальная температура, удельная влажность, потенциальный вихрь), имеющие свойство сохраняться вдоль траекторий движения воздуха [Поддубный, Наговицына, 2013; Дубинкина, 2015].

Совместный анализ обратных траекторий движения воздушных потоков и результатов измерений параметров атмосферы позволяет получать более обширную

информацию о содержании атмосферных примесей. Существуют методы статистики обратных траекторий, которые позволяют на основе мониторинга и информации о динамике атмосферы для исследуемых регионов по локальным измерениям восстанавливать пространственную структуру измеряемого параметра. При этом полагают, что:

1) информация о поступлении примеси в атмосферу переносится к прибору из других пространственных областей благодаря движению воздушных потоков;

2) «пересечение» (прохождение над одной и той же территорией в разное время) траекторий движения воздушных частиц, несущих различные значения сигнала, позволяет локализовать области пространства с вероятно более высоким уровнем измеряемого признака [Поддубный, Наговицына, 2013; Дубинкина, 2015].

Методы статистики обратных траекторий разработаны для решения задач оценки пространственной структуры полей измеряемой величины по данным локальных приборных измерений, выполненных в одной или нескольких фиксированных точках за большой период времени. Возможность оценки полей по данным измерений в отдельной точке реализуется за счет вовлечения в анализ информации о динамике атмосферных потоков [Дубинкина, 2015].

Выводы к главе 1

В главе 1 представлен анализ приборов, методов, инструментов наземного и дистанционного зондирования, а также моделирования, используемых для измерения основных параметров оптических и гидрофизических характеристик атмосферы и океана (моря).

Литературный обзор позволил выделить основные характеристики атмосферного аэрозоля, которыми являются: аэрозольная оптическая толщина, показатель Ангстрема и функция распределения аэрозольных частиц по размерам, методики определения которых представлены в главе.

Показано, что вычисление оптических характеристик атмосферного аэрозоля трех типов аэрозоля (фоновый, пылевой и дымовой) над акваторией Черного моря целесообразно проводить по данным измерений фотометров.

Проведенный обзор литературных данных показал, что оптические характеристики атмосферного аэрозоля, полученные отдельно по натурным, модельным, или спутниковым данным не дают объективной оценки. Только комплексное исследование трех типов данных позволяет получить наиболее полную информацию об атмосферном аэрозоле, источниках аэрозольной активности, направлении перемещения воздушных потоков на разных высотах, а также области осаждения и воздействия аэрозоля на подстилающую поверхность.

Результаты исследований, представленные в первой главе работы, опубликованы в [Калинская, 2012; Толкаченко и др., 2012; Калинская, Суслин, 2016; Калинская, Папкина, 2017; Калинская и др., 2017; Калинская, Рябоконь, 2019; Калинская, 2021; Калинская, 2022; Калинская, Папкина, 2021; Шибанов, и др, 2022; Калинская, Папкина, 2023].

ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХ ТИПОВ АЭРОЗОЛЕЙ НАД ЧЁРНЫМ МОРЕМ

2.1 Методика определения источников приземного аэрозоля по данным моделирования

Перед тем как перейти к определению количественных оценок оптических характеристик фонового, пылевого и дымового аэрозоля над Чёрным морем нам потребуется выбрать инструмент для регистрирования каждого из этих аэрозолей по отдельности. Одним из таких инструментов является предложенный в этой главе алгоритм определения источников приземного аэрозоля.

Знания об оптических характеристиках аэрозоля находят применение в ряде важных прикладных задач. В частности, они лежат в основе так называемых таблиц lookup tables, которые используются в задачах атмосферной коррекции для восстановления спектра излучения, выходящего из-под поверхности воды, по измерениям восходящей яркости на верхней границе атмосферы (до 5 км). Дополнительной важной информацией являются такие характеристики как географический район и время, где и когда аэрозоль зарождается до того, как он оказывается над Чёрным морем [Гущин, 1988].

Предлагаемый алгоритм [Калинская, Суслин, 2015] использует результаты расчётов глобальной метеорологической модели о кинематике различных слоёв атмосферы, которые выложены в открытом доступе в сети Интернет [Архив AERONET]. На рисунке 3.2, представлены последовательные шаги обработки данных обратных траекторий ВТА (Back trajectory analysis) [Dubovik, King, 2000; Dubovik, et al., 2002; Поддубный, Наговицына, 2013]. Данные ВТА лежат в основе алгоритма пространственно-временной локализации источников аэрозоля, образовавшегося в нижних слоях атмосферы и достигшего определённого района, в нашем случае – севастопольской станции AERONET. На Рисунках 2.1, а, б, приведены исходные данные на примере одного дня 17.12.2008. Они представляют собой таблицу в ascii-кодах, которая содержит информацию о 7-ми суточной

истории для 8-ми атмосферных слоёв (от 1000 до 200 мбар с шагом 100 мбар): номер атмосферного слоя (от 0 до 7), время UTC с шагом 15 минут, широта и долгота и давление (P), измеряемое в мбар. Изменение положения каждого атмосферного слоя как функции времени показано на Рисунке 2.1, а. Проекция траектории на поверхность Земли каждого из 8-ми слоев в течение 7-мисуток до их появления на станции AERONET показана на Рисунке 2.1, б. Ключевым параметром предлагаемой методики является производная давления по времени (P'_t). На Рисунке 2.1, в, показан расчет этого параметра для каждого из 8-ми слоёв. Положительный знак P'_t соответствует восходящим воздушным потокам, отрицательный знак – нисходящим. Критерием источника аэрозоля, образовавшегося в определённом месте у поверхности Земли, считалась ситуация, когда одновременно были выполнены два условия:

- 1) $P > 700$ мбар– это условие означает, что воздушная масса находится в приземном слое;
- 2) $P'_t > 20$ мбар/час соответствует восходящему потоку со скоростью $v \sim 10$ км/час и более.

Оценка величин производной давления по времени получена по формуле

$$P'_t = \rho g v, \quad (2.1)$$

где ρ – плотность воздуха;

g – ускорение свободного падения.

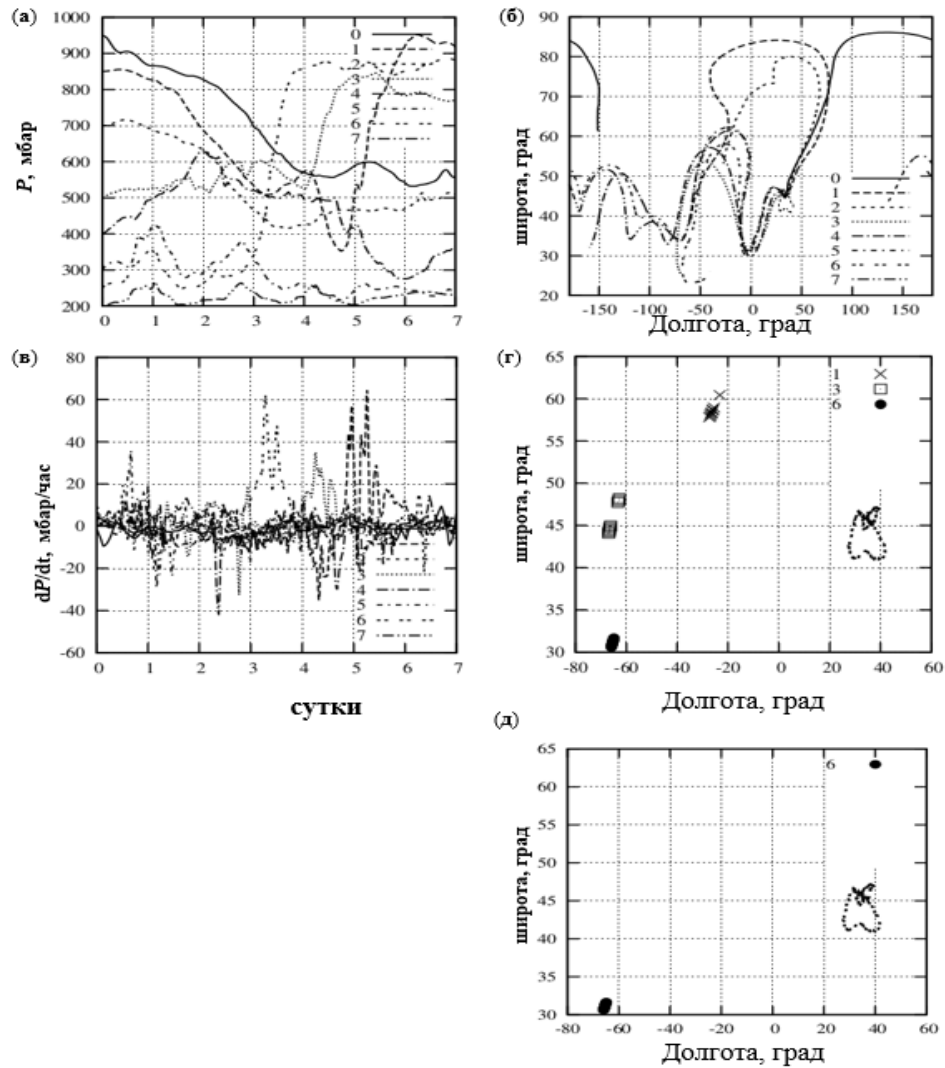


Рисунок 2.1 – Последовательные этапы применения алгоритма на примере данных ВТА за 17 декабря 2008 г.: динамика изменения давления (P) для восьми слоев за 7 предшествующих дней перед их появлением на севастопольской станции AERONET (а) и их проекция на поверхность Земли (б); производная давления по времени P'_t для 8 слоёв за 7 дней (в); географическое положение восходящих потоков ($P'_t > 20$ мбар/час) из приземных слоев ($P > 700$ мбар) (г); географическое положение восходящих потоков ($P'_t > 20$ мбар/час) из приземных слоев ($P > 700$ мбар) с браковкой нисходящих потоков ($P'_t < -20$ мбар/час), которые по времени были позже восходящих потоков (д) [Калинская, Суслин, 2015]

Условие $P'_t = 20$ мбар/час соответствует тому, что за 1 час воздушная масса из нижнего слоя атмосферы перемещается высоту на 10 км. В рамках нашего алгоритма это означает, что нулевой нижний слой занимает положение 7-ого верхнего слоя. Таким образом можно определить географическое положение района (Рисунок 2.1, г) и время (Рисунок 2.1, а, в), для которых выполнялись условия, описанные выше. Цифра 1 к легенде рисунка соответствует номеру слоя, в котором эта воздушная масса оказалась над севастопольской станцией AERONET на 0 UTC 17.12.2008.

Алгоритм также учитывает процесс «выпадения осадков», который является обратным процессом для указанных ранее условий. Процесс «выпадения осадков» влечет за собой «обнуление» всей информации об источнике аэрозоля, который первоначально считался точкой отсчета построения перемещения воздушных потоков. Критерием «выпадения осадков», т.е. нисходящего воздушного потока является одно условие: P'_t мбар/час. Если оно выполняется, то «обнуляется» вся предыстория соответствующего атмосферного слоя, т.е. считается, что атмосферный слой уже не содержит аэрозоль, поднятый ранее восходящими потоками с поверхности Земли. На Рисунке 2.1, д, показан результат применения нашего алгоритма. Он означает, что 17.12.2008 в 0 часов UTC на высоте 300 – 400 мбар (слой 6) над севастопольской станцией AERONET оказалась воздушная масса, которая сформировалась в поверхностном слое в западной части Атлантического океана 13.12.2008.

На Рисунке 2.1 показан результат, означающий, что 17.12.2008 в 0 часов UTC на высоте 300 – 400 мб над севастопольской станцией AERONET оказалась воздушная масса, которая сформировалась в поверхностном слое в западной части Атлантического океана.

2.2 Статистика источников генерации аэрозоля над Черным морем по сезонам и географическому положению

Для тестирования алгоритма использовались ежедневные данные ВТА за 2007 – 2010 гг. Данные загружены с сайта [<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.] для севастопольской станции AERONET.

В данной подглаве вводится обозначение «события», которое указывает исходные координаты источников приземного аэрозоля.

На Рисунке 2.2, а, показана гистограмма «событий» как функция атмосферного слоя над севастопольской станцией AERONET. В нижних слоях атмосферы (слои 0 – 3) доминируют «события», возникшие над сушей. Максимум находится во 2-ом слое. В верхних слоях атмосферы (слои 4 – 7) доминируют «события», возникшие над водной поверхностью. На Рисунке 2.2, б, показана гистограмма «событий» как функция года. В 2007 – 2008 гг. наблюдается паритет между «событиями» над водной поверхностью и сушей. В 2009 и 2010 гг. паритет нарушается в сторону «событий», произошедших над сушей, что тоже является новым интересным фактом. Суммарное количество «событий» над сушей и над водой в 2007 году существенно меньше, чем в 2008 – 2010 годах. Обнаруженный факт указывает на высокую межгодовую изменчивость этого параметра. Гистограмма «событий» как функция месяца показана на Рисунке 2.2, в. За исключением 4-х месяцев (весною в марте-апреле и осенью в октябре-ноябре), когда наблюдается приблизительное равенство «событий» над сушей и водой, в остальные месяцы года количество «событий» над сушей доминирует. Абсолютный максимум достигается в декабре, а абсолютный минимум – в августе. Кроме того, имеются два локальных максимума в марте и октябре.

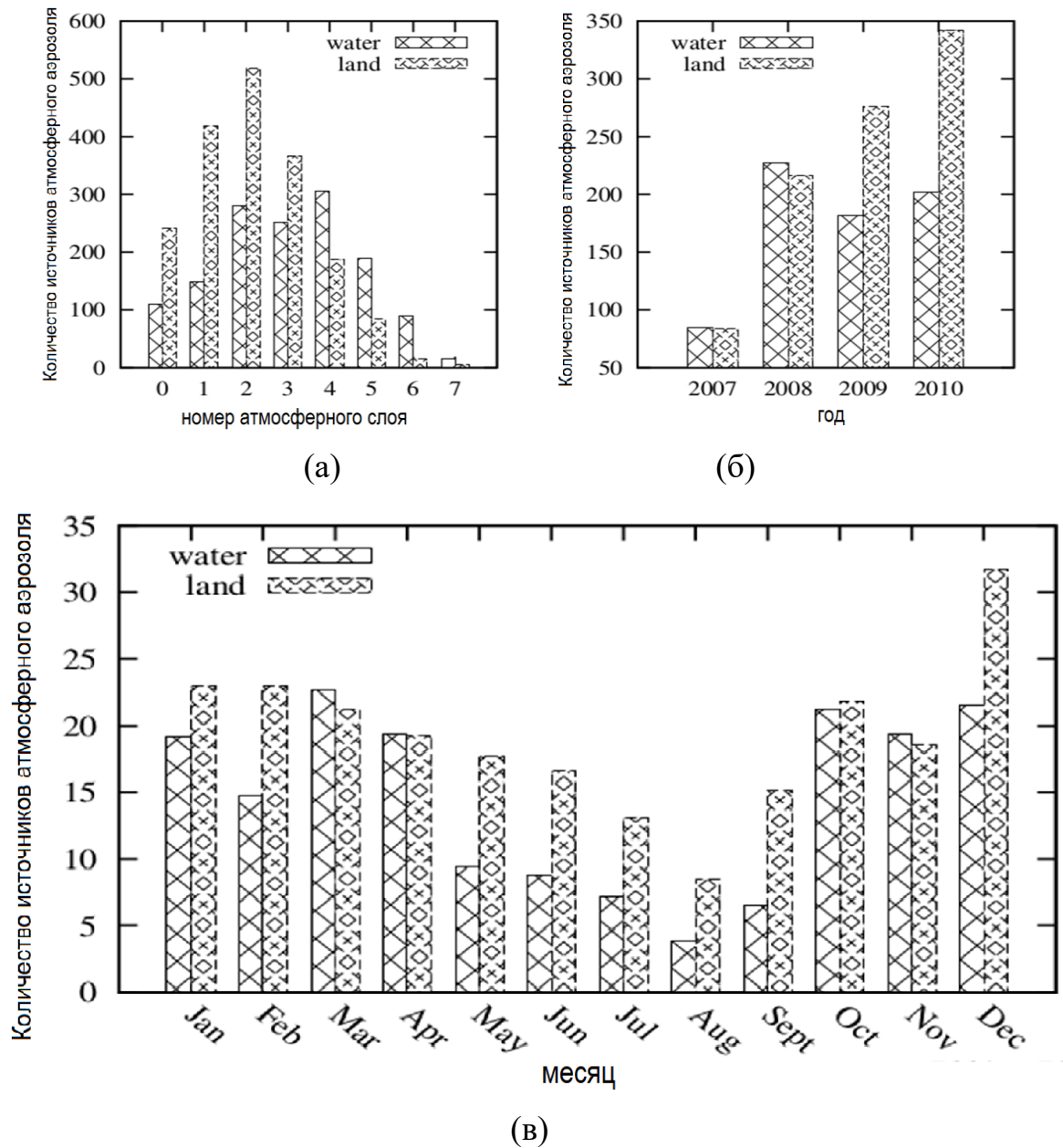


Рисунок 2.2 –Статистика «событий» за 2007 – 2010 гг. на станции AERONET Sevastopol: по слоям (а), по годам (б) и по месяцам (в) с учётом подстилающей поверхности (суша/море) [Калинская, Суслин, 2015]

Карты плотности «событий» показаны на Рисунке 2.3. Они представляют собой ячейки $2^\circ \times 2^\circ$, цвет которых является функцией числа «событий», реализовавшихся в течение соответствующего года.

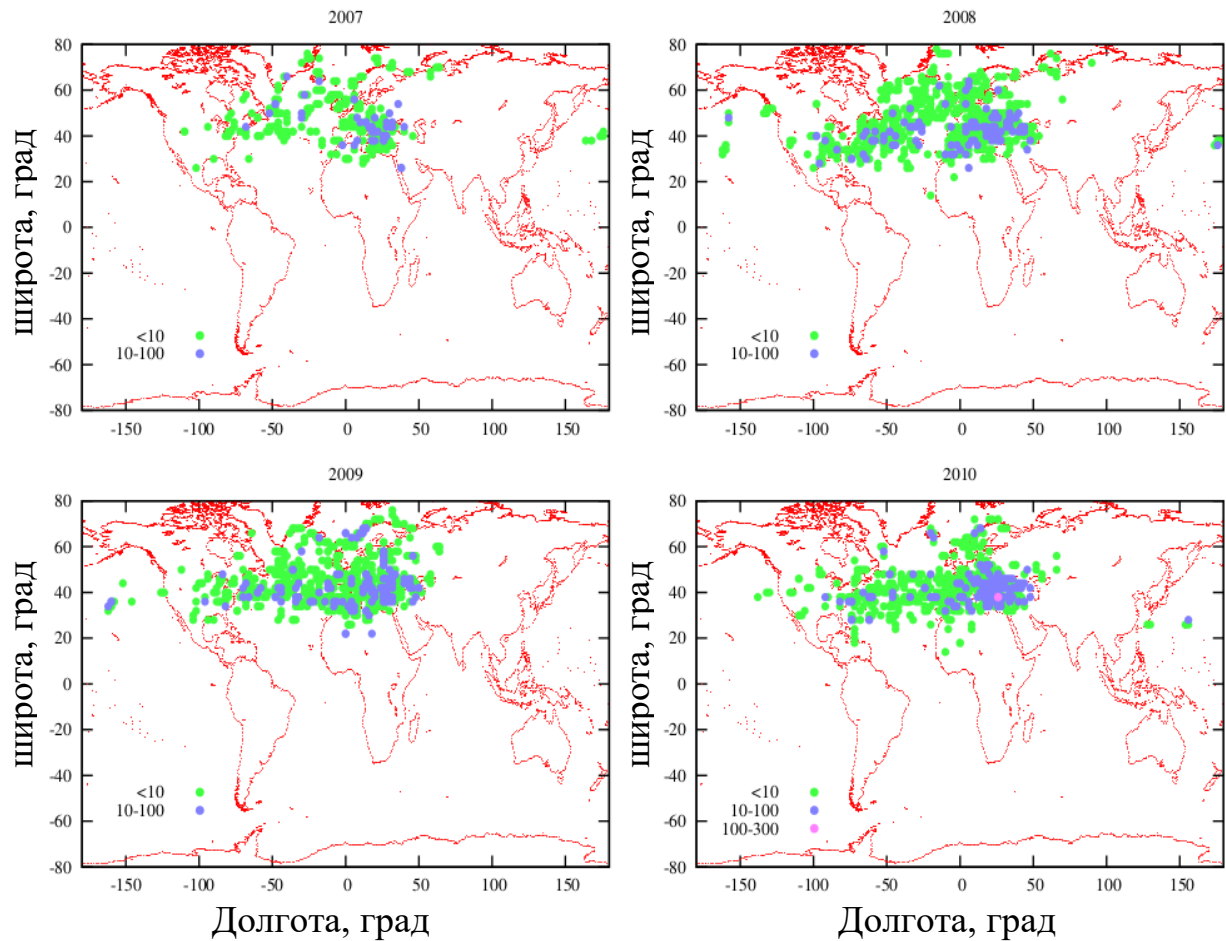


Рисунок 2.3 – Карты плотности источников приземного аэрозоля («событий») за 2007–2010 гг., где зеленые точки – менее 10 источников аэрозольной активности, синие точки – от 10 до 100 источников, розовые точки – от 100 до 300 [Калинская, Суслин, 2015]

Анализ распределений плотности источников показал, во-первых, очевидное преимущество западного переноса. В основном все источники сосредоточены в полосе $30^{\circ} - 50^{\circ}$ с.ш. от 100° з.д. до 50° в.д. Во-вторых, наибольшая плотность источников находится в непосредственной близости от Черного моря (районы Турции и Балкан). В-третьих, высокая межгодовая изменчивость в 2010 г. источников в Северной Атлантике гораздо меньше, чем в 2008 и 2009 гг., в то время как ситуация над сушей приблизительно одна и та же. Отдельно отметим район Северной Африки и Малой Азии, которые являются источниками поглощающего аэрозоля. Как показывает более детальный анализ, эти источники активны в течение всего года.

На Рисунке 2.4 показаны две гистограммы показателя Ангстрема аэрозольной оптической толщины, полученные по данным level 2.0 сети AERONET на станции Sevastopol за период 2007 – 2010 гг. Гистограмма (Рисунок 2.4, а) построена по всем измерениям, а гистограмма (Рисунок 2.4, б) только для тех дней, когда вышеописанная методика зафиксировала приход воздушных масс из района Северной Африки. На гистограмме (Рисунок 2.4, б) явно виден бимодальный характер распределения показателя Ангстрема, который указывает на присутствие крупной фракции, что характерно для сахарской пыли. Различие гистограмм на Рисунке 2.4 косвенно подтверждает работоспособность предложенного способа обнаружения по данным ВТА места и времени существования источника приземного аэрозоля.

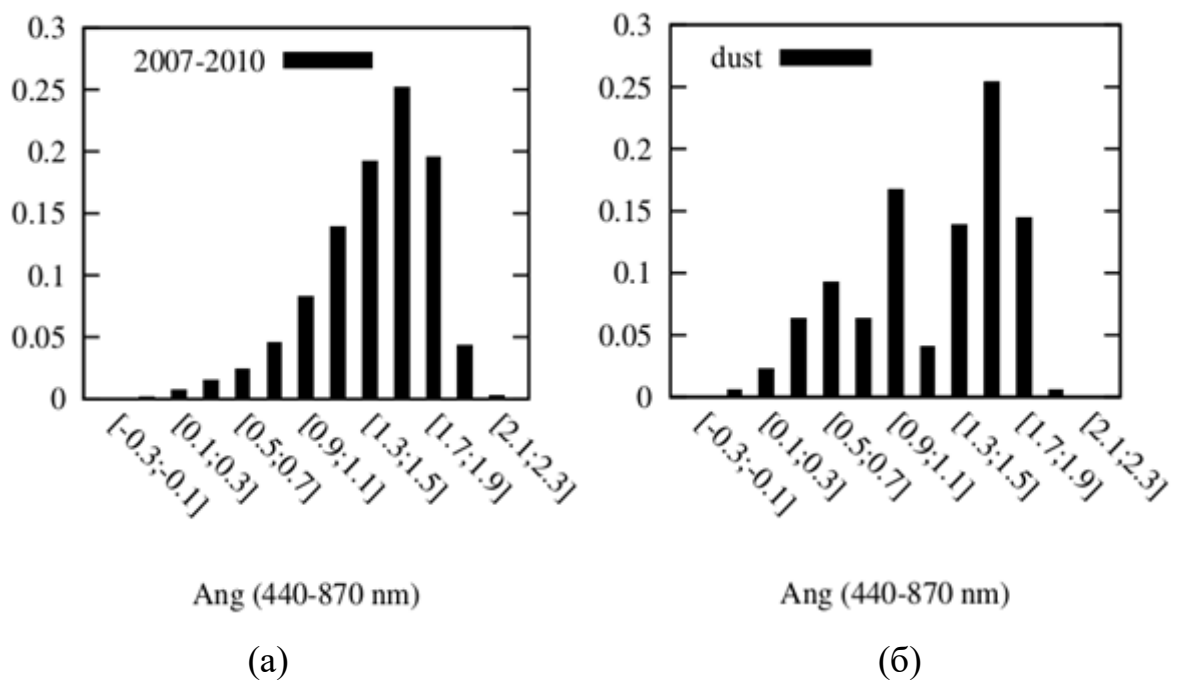


Рисунок 2.4 – Гистограммы, полученные по данным AOT level 2.0 сети AERONET на станции Sevastopol за период 2007 – 2010гг.: все измерения (N=29041) (а) и для дней, когда аэрозоль из нижних слоев Северной Африки достиг района Севастополя (N = 173) (б) [Калинская, Суслин, 2015]

Для валидации алгоритма использован следующий подход:

1) Фиксированы два района равноудалённых от севастопольской станции AERONET: район Северной Африки (20° – 30°с.ш. и 10° з.д. – 30° в.д.) и Турции

($37.95^{\circ} - 40^{\circ}$ с.ш. и $29.54^{\circ} - 38.37^{\circ}$ в.д.). Оба района являются источниками пылевого аэрозоля. Мелкодисперсная фракция пылевого аэрозоля (частицы с диаметром <1 мкм) может распространяться воздушным потоком достаточно далеко от их источника возникновения и долгое время оставаться в атмосфере [Кондратьев и др., 1983]. Этот тип аэрозоля заметно поглощает солнечное излучение [Zurek, 1982; Гинзбург, Соколик, 1989], что вызывает определенные трудности при интерпретации результатов атмосферной коррекции [Гинзбург, Соколик, 1989].

2) С использованием данного алгоритма составлен список дат, соответствующих «событиям», реализовавшихся в каждом из двух районов за период с 2007 по 2012 гг. Для этих выборок построены гистограммы трех характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (AOT(500)), показателя Ангстрема аэрозольной оптической толщины для диапазона 440 – 870 нм (α) и компоненты аэрозольной оптической толщины на длине волны 440 нм, связанной с поглощением солнечной радиации (τ_{ab}). Первые два параметра являются наиболее распространёнными для описания свойств аэрозоля. Последний – важный параметр для дистанционного зондирования морских акваторий с искусственных спутников Земли. Все три параметра рассчитаны по данным измерений AERONET [Suslin, et al., 2007; Dubovik, King, 2000].

3) Полученные гистограммы для каждого параметра сравнивались с гистограммой этого параметра, построенной за период наблюдений с 2007 по 2012 гг. на севастопольской станции AERONET без каких-либо исключений.

Из Рисунка 2.5 видно, что гистограммы рассматриваемых параметров для двух районов имеют существенные отличия от суммарной гистограммы этих же параметров, построенной для всего массива измерений. Так, у гистограмм α и τ_{ab} для выбранных районов нарушен одномодальный характер распределения.

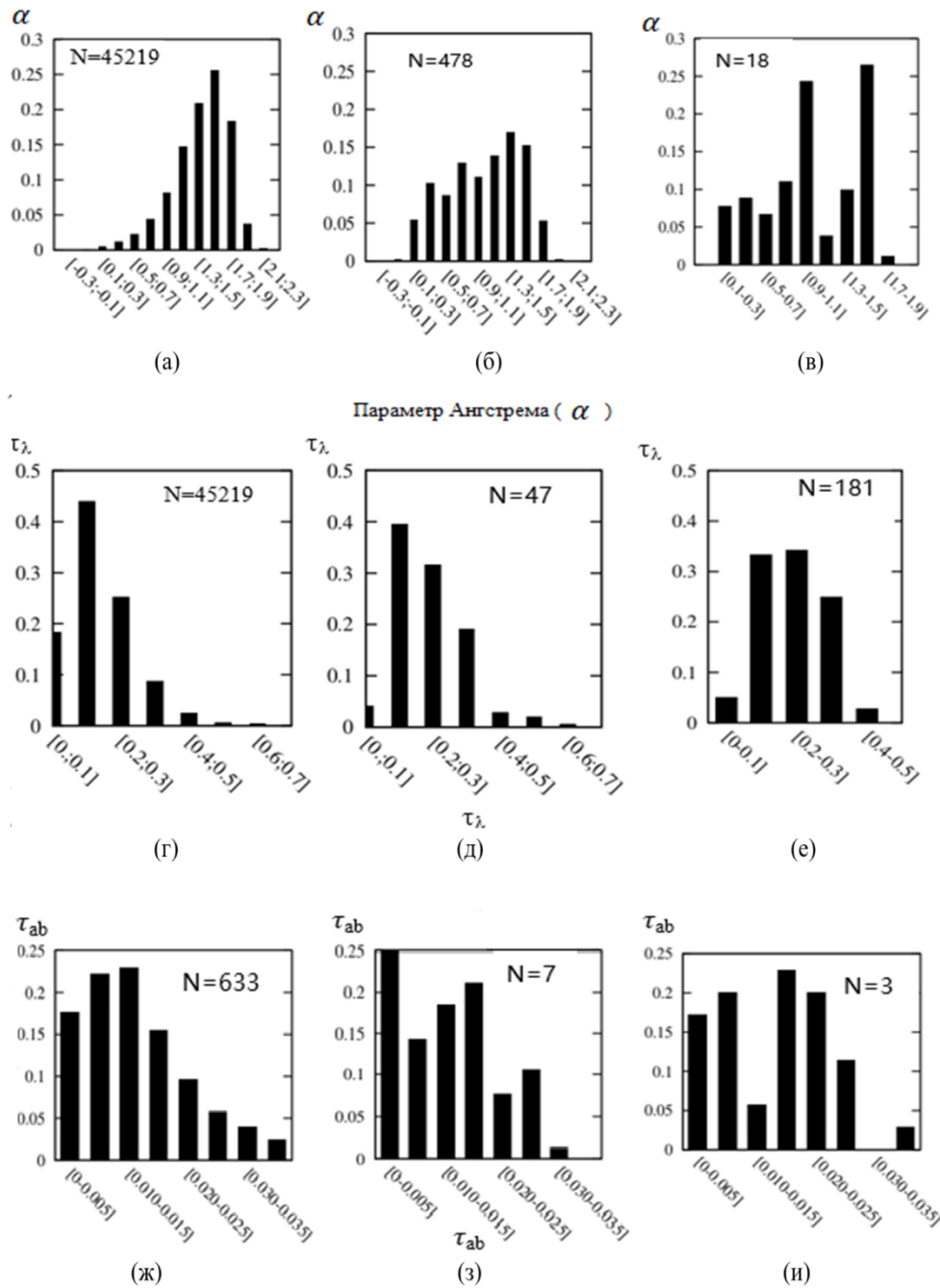


Рисунок 2.5– Гистограммы параметр Ангстрема (440 – 870 нм, а, б, в), аэрозольной оптической толщины (500 нм, г, д, е) и компоненты аэрозольной оптической толщины τ_{ab} (440 нм, ж, з, и), связанной с поглощением, полученные по данным измерений на севастопольской станции AERONET за период 2007 – 2012 гг.: все измерения (левый столбец), для дат «событий», реализовавшихся в районе Северной Африки (средний столбец) и в районе Турции (правый столбец). N – число измерений, использованных при построении гистограммы [Калинская, Суслин, 2015]

Сдвиг максимума гистограммы для α в область более низких значений по сравнению со всей выборкой указывает на увеличение вклада фракции крупных частиц. Это обстоятельство, а также сдвиг максимума гистограмм для α и τ_{ab} в область высоких значений, являются характерным признаком пылевого аэрозоля [Калинская, 2012]. Различие гистограмм на Рисунке 2.5 косвенно подтверждает работоспособность предложенной методики обнаружения по данным ВТА источника приземного аэрозоля.

Предложенный алгоритм в совокупности с данными AERONET можно использовать при решении следующей задачи. Выберем все даты, когда на севастопольской станции наблюдались высокие значения $\tau_{ab}(440) > 0,04$. За период с 2007 по 2012 гг. таких дней оказалось 135 и они охватывали все сезоны. Наибольшее количество дат пришлось на весну и лето. Последнее обстоятельство, скорее всего, объясняется отсутствием облачности в момент измерения на севастопольской станции, а не сезонным ходом появления поглощающего аэрозоля над Чёрным морем. Полученная выборка интересна тем, что именно для безоблачных дней можно использовать данные спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра. Эта выборка была обработана по алгоритму с использованием ВТА, описанному выше.

На Рисунке 2.6 показано, что, подавляющее количество источников расположено над сушей. Второе, в нижние слои (0 – 3) над севастопольской станцией попадают аэрозоли от источников, расположенных вблизи Чёрного моря (Западная Европа, Турция, Иран). В верхние слои (4 – 6) попадает аэрозоль от удалённых источников, расположенных в северной Африке (Сахара), северной части Аравийского полуострова и на восточном побережье США. Местоположение источников (пустыни, промышленные районы) косвенно подтверждает наблюдаемые свойства аэрозоля для рассматриваемой выборки.

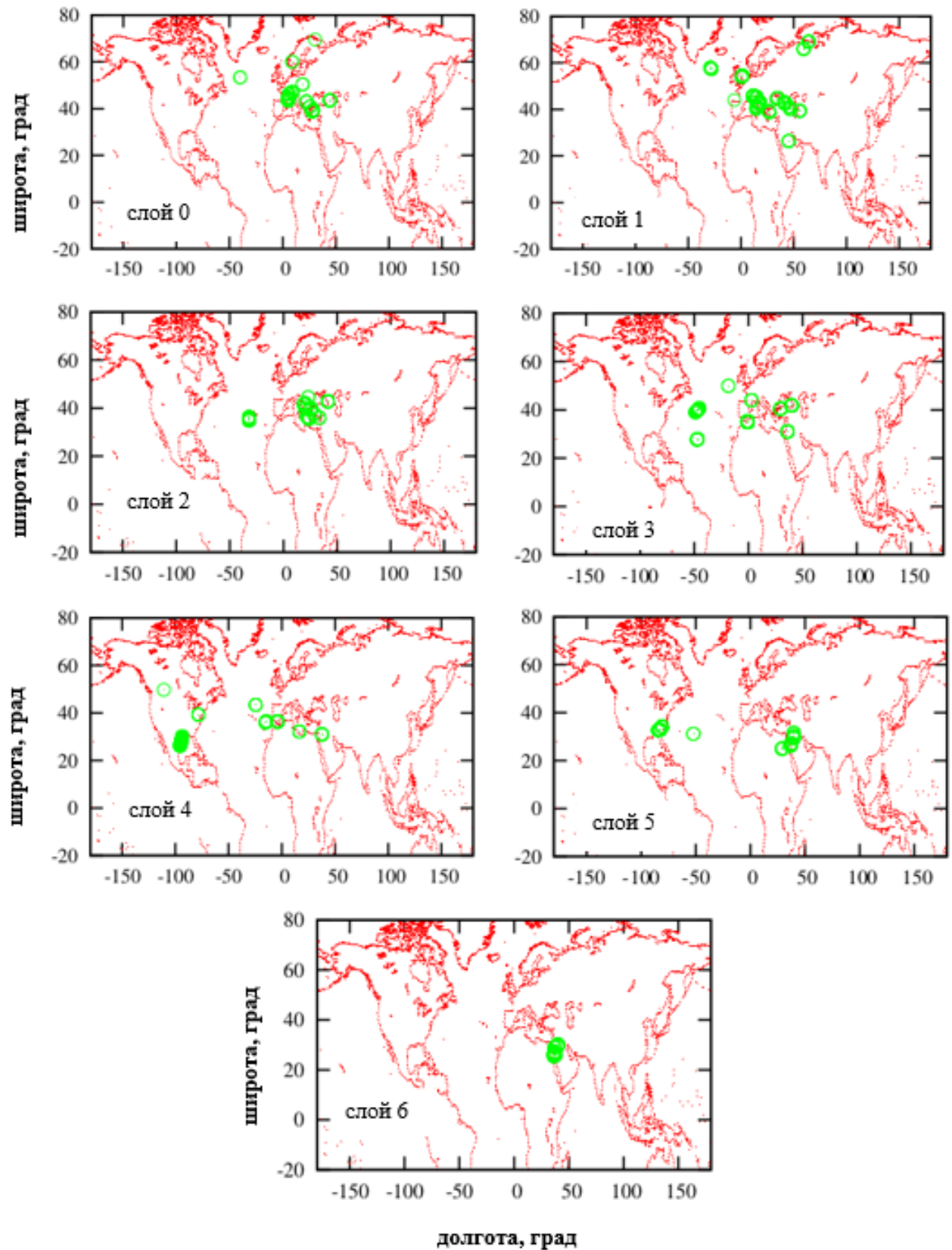


Рисунок 2.6 – Источники приземного аэрозоля для выборки $\tau_{ab}(440) > 0,04$ на севастопольской станции AERONET за период 2007 – 2012 гг. как функция номера атмосферного слоя [Калинская , Суслин, 2015]

Небольшое количество источников расположено в северной части Атлантического океана. Почему на севастопольской станции для этих случаев наблюдался поглощающий аэрозоль – остается неясным и требует дополнительных исследований.

Семидневные обратные траектории ВТА подготовлены для всех станций сети AERONET для каждого дня с начала работы соответствующей станции. Несмотря на то, что с весны 2015 г. измерения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в рамках сети AERONET на станции Sevastopol были прекращены, результаты моделирования обратных траекторий для данной станции есть по настоящее время. Благодаря этому удалось продолжить статистическое исследование количества переносов пылевого аэрозоля в черноморский регион со стороны пустыни Сахара и Сирийской пустыни.

Из массива данных обратных траекторий переноса воздушных масс выбрано 2 региона: район Сахары в Северной Африке ($20^{\circ} - 30^{\circ}$ с. ш. и 10° з. д. – 30° в. д.) и Сирии ($15^{\circ} - 35^{\circ}$ с.ш. и $35^{\circ} - 50^{\circ}$ в.д.). Оба района относятся к аридным зонам и являются источниками пылевого аэрозоля [Kubilay, et al., 2003].

По методике, описанной в параграфе 2.1, для периода с 2007 по 2015 гг. получены результаты обратных траекторий переноса атмосферного аэрозоля, образовавшегося в нижних слоях атмосферы за счет частиц подстилающей поверхности и достигшего станции Sevastopol (44.61583° с. ш., 33.51733° в. д.) [Архив AERONET]. Анализ данных показал, что основной вклад при регистрации события выноса пылевого аэрозоля вносит его перенос в приземных слоях атмосферы над исследуемым регионом, а именно в слоях от 500 м до 3 км, соответствующие слоям ВТА AERONET 950 – 700 гПа [Калинская, Суслин, 2015].

Сопоставление результатов, полученных в 2016 г., с многолетним массивом данных ВТА, полученных с помощью сети AERONET, показало необходимость комплексного анализа переноса воздушных масс посредством и других атмосферных моделей. Для сравнительного анализа выбрана модель, предоставляющая результаты переноса атмосферных воздушных масс на тех же высотах, что и предоставляет сеть AERONET. Этими высотами являются 950 гПа, 850 гПа и 700 гПа,

что соответствует 500 м, 1500 м и 3000 м соответственно. Эта модель разработана учёными из лаборатории атмосферных ресурсов (Архив Air Resources Laboratory) для получения новых представлений об атмосферном рассеивании, химическом составе атмосферы, изменении климата и сложном поведении атмосферы у поверхности Земли в атмосферном пограничном слое.

Исследования переноса аридного аэрозоля со стороны пустыни Сахара и Сирийской пустыни за период исследований с 2007 по 2016 гг. по данным сети AERONET показали наименьшее количество переносов со стороны Сирийской пустыни в 2016 г. Однако относительно переносов со стороны пустыни Сахара ситуация обратная: 2016 г. уступает количеством интенсивных переносов лишь 2014 г., когда было зарегистрировано максимальное количество выносов пылевого аэрозоля из двух регионов пустынь (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Статистика количества дней переноса аэрозоля со стороны Сирийской пустыни и со стороны пустыни Сахара над Чёрным морем по годам [Калинская, Кудинов, 2017]

Данные ВТА \ год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
слои ≥ 700 гПа (Сирия)	17	17	17	24	17	21	19	35	19	7
слои ≥ 700 гПа (Сахара)	51	69	65	72	45	59	64	82	54	79

Анализ сезонной изменчивости за период с 2007 по 2015 гг. показал, что наиболее часто на всех предоставляемых сетью AERONET высотах перенос как со стороны Ближнего востока, так и пустыни Сахара происходит весной и зимой, причём для случаев переноса ближневосточного аэрозоля максимальное количество случаев наблюдалось весной, а для случаев выноса пылевого аэрозоля пустыни Са-

хара – зимой. Сравнительный анализ данных переноса аридного аэрозоля в приземных слоях за период с 2007 по 2015 гг. и данных ВТА за 2016 г. подтвердил максимальное количество случаев выноса зимой и весной, однако для аэрозоля пустыни Сахара максимальное количество, в отличие от предыдущих исследований, было получено весной (Таблица 2.2).

Среднее значение количества переносов аэрозоля за период с 2007 по 2015 гг. со стороны Сирии составляет 6 случаев в зимний период и 8 случаев в весенний период, а за 2016 г. 3 случая в зимний период и 2 случая в весенний период, что говорит об аномально низкой активности переносов со стороны Ближнего востока в этом году. Также отличие в данных за период с 2007 по 2015 гг. и за 2016 г. наблюдалось в летний и осенний период. В 2016 г. осенью выявлено аномально низкое количество переносов аридного аэрозоля в черноморский регион, хотя предыдущие исследования показывали резкое уменьшение (более чем в 5 раз) количества переносов со стороны пустыни Сахара не в осенний, а в летний период (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Статистика количества дней переноса аэрозоля со стороны Сирийской пустыни и пустыни Сахара над Чёрным морем по сезонам [Калинская, Кудинов, 2017]

Данные ВТА \ сезон	Зима	Весна	лето	осень
слои ≥ 700 гПа (Сирия) с 2007-2015 г.	58	73	20	35
слои ≥ 700 гПа (Сахара) с 2007-2015 г.	195	184	38	144
слои ≥ 700 гПа (Сирия) за 2016 г.	3	2	2	0
слои ≥ 700 гПа (Сахара) за 2016 г.	23	33	13	10

Сравнительный анализ результатов статистической обработки данных обратных траекторий по модели ВТА AERONET и модели HYSPLIT показали отличия значений по месяцам как для случаев регистрации переноса аэрозоля со стороны пустыни Сахара, так и со стороны Сирийской пустыни (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Сравнительный анализ статистических данных количества дней переноса аэрозоля со стороны Сирийской пустыни и пустыни Сахара над Чёрным морем моделей ВТА и HYSPLIT по месяцам за 2016 год [Калинская, Кудинов, 2017]

Район	Модель \ месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
САХАРА	HYSPLIT	3	9	14	11	2	4	0	1	3	3	10	0
	AERONET	6	17	13	17	3	11	0	2	2	1	7	0
СИРИЯ	HYSPLIT	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	AERONET	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	2

При анализе количества случаев переноса ближневосточного аэрозоля (аэрозоля со стороны Сирийской пустыни) в черноморский регион по модели ВТА сети AERONET за 2016 г. выявлено 2 максимума (в марте и в декабре), тогда как по результатам модели HYSPLIT перенос происходил лишь в августе, и более не зафиксирован ни в один месяц этого года (Таблица 3.3).

Сравнительный анализ количества случаев переноса аридного аэрозоля пустыни Сахара по двум моделям также показал несоответствие результатов данных траекторий по двум моделям: максимумы регистрации случаев выноса пылевого сахарского аэрозоля по данным ВТА – февраль и апрель (по 17 случаев за каждый из этих месяцев), а по результатам HYSPLIT максимум наблюдался в марте, когда было зарегистрировано 14 случаев переноса данного типа аэрозоля в приземном слое атмосферы над черноморским регионом.

Сезонная изменчивость данных обратных траекторий по результатам двух моделей представлена в Таблице 2.4. По данным траекторий переноса как ВТА AERONET, так и модели HYSPLIT максимальное число выносов аридного аэрозоля пустыни Сахара за 2016 г. наблюдалось весной, однако минимум активности по данным модели ВТА наблюдался летом (5 случаев переноса), а по данным модели HYSPLIT осенью (10 случаев переноса на всех исследуемых высотах).

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ статистических данных количества дней переноса аэрозоля со стороны Сирийской пустыни и пустыни Сахара над Чёрным морем моделей ВТА и HYSPLIT по сезонам за 2016 год [Калинская, Кудинов, 2017]

Район	Модель \ месяц	зима	Весна	Лето	осень	2016 г.
САХАРА	HYSPLIT	12	27	5	16	60
	AERONET	23	33	13	10	79
СИРИЯ	HYSPLIT	0	0	2	0	2
	AERONET	3	2	2	0	7

Анализ данных обратных траекторий переноса воздушных масс показал, что наиболее часто перенос пылевого аэрозоля регистрируется на высоте 3 км (слой 700 гПа), причём как по данным модели AERONET (68% от всех случаев переноса), так и по данным модели HYSPLIT (63 % от всех случаев переноса).

Для определения достоверности данных обратных траекторий двух моделей необходимо провести сравнение с данными, полученными при натурных измерениях. Сеть AERONET предполагает проведение валидации метода получения обратных траекторий со значениями основных оптических характеристик, полученными посредством фотометров CIMEL (CE-318), которые имеются на всех станциях. Поскольку с марта 2015 г. измерения оптических характеристик на станции Sevastopol посредством CE-318 были прекращены, сопоставление данных моделей AERONET и HYSPLIT можно проводить только с измерениями оптических характеристик, полученных посредством другого фотометра – SPM. В основном анализ проводился на основе спектральных составляющих АОТ атмосферы (τ_{λ}^a), параметра Ангстрема (α), характеризующего спектральную селективность АОТ ($\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$) и мелко- и грубодисперсных компонент АОТ ($\tau_{\lambda}^a = \tau_{\lambda}^f + \tau^c$). Отметим, что методики определения τ_{λ}^a , τ^c и $\tau_{0.5}^f$ для фотометров CE-31 и SPM имеют отличия [Кабанов и др., 2009; O'Neill, et al., 2001; O'Neill, et al., 2003; Сакерин,

2012], однако, как следует из сопоставления совместных измерений этими фотометрами, средний квадрат отклонения между результатами (τ_λ^a , τ^c и $\tau_{0.5}^f$) не превышает погрешности их измерений.

При регистрации пылевого аэрозоля над черноморским регионом наблюдается увеличение значений τ_λ^a и уменьшение вплоть до отрицательных значений параметра α [Кабанов и др., 2009], поэтому из массива данных за 2016 г. выбраны именно такие значения. На рисунке 2.7 видно, что период с высокими значениями АОТ и низкими значениями α наблюдался в апреле, когда по данным AERONET также зарегистрировано наибольшее количество переносов со стороны пустыни Сахара.

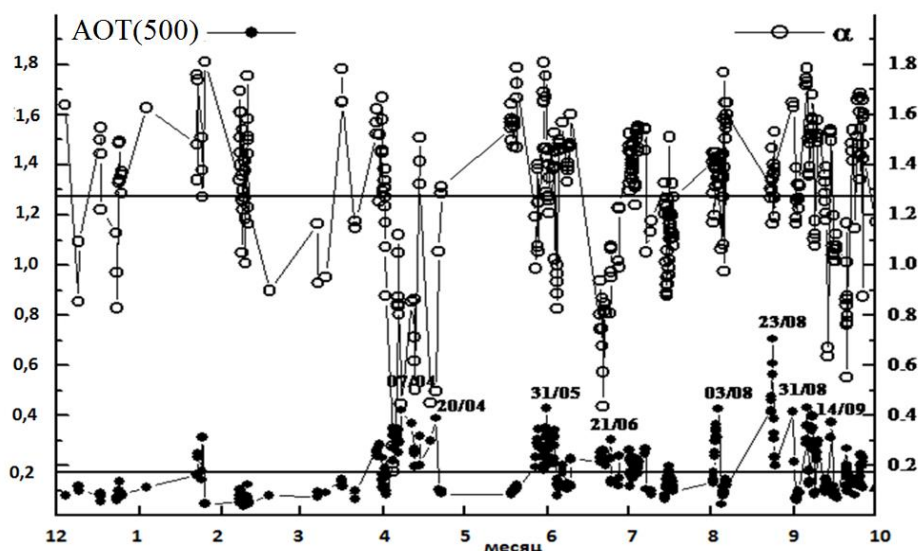


Рисунок 2.7 – Межгодовая изменчивость среднедневных величин АОТ (500) и параметра Ангстрема α за исследуемый период [Калинская, Кудинов, 2017]

Данные мелко- и грубодисперсных компонент АОТ также подтвердили превалирование крупных частиц в атмосфере в весенний период над черноморским регионом.

Анализ массива данных фотометрических измерений АОТ, параметра Ангстрема и распределения частиц по размерам, полученных в Севастополе и экспеди-

циях, для выявленных случаев переноса пыли пустынь в регион Черного моря позволили получить следующие оптические характеристики для пылевого аэрозоля: $AOT(500) > 0,3$, $\alpha < 0,8$, а для распределения частиц по размерам, особенно в весенне-летний период, характерно преимущество крупных аэрозольных частиц (τ°).

Данные обратных траекторий по результатам моделирования AERONET и HYSPLIT отличаются. В результате анализа массива данных за 2014 – 2016 гг. выявлены дни, когда по результатам одной модели был перенос аридного аэрозоля, а по результатам другой модели переноса зарегистрировано не было. Такие дни за весенний период 12 и 20 апреля 2016 г. (Рисунок 2.8).

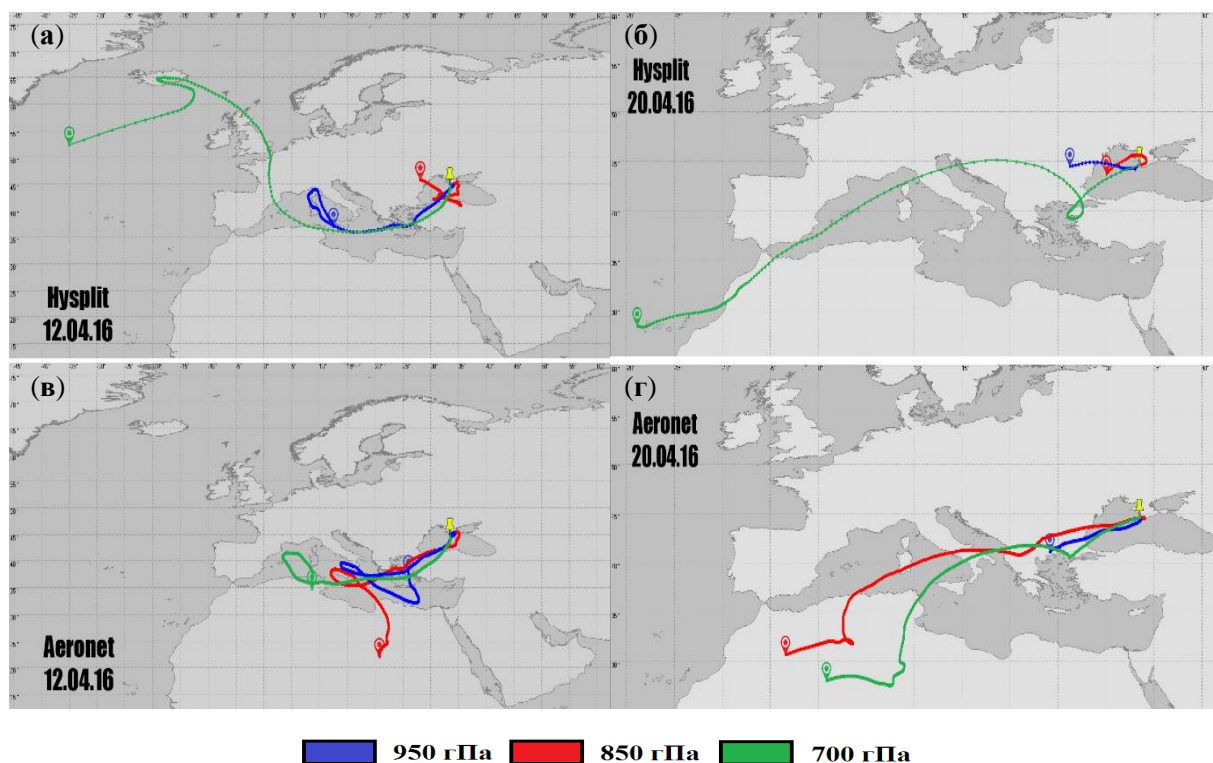


Рисунок 2.8 – Обратные траектории, полученные в результате моделирования обратных траекторий HYSPLIT за 12.04.2016 (а); HYSPLIT за 20.04.2016 (б); AERONET за 12.04.2016 (в); AERONET за 20.04.2016 (г), где синяя кривая – траектория перемещения на высоте 950 гПа, красная – 850 гПа, зеленая – 700 гПа [Калинская, Кудинов, 2017]

Для 12 и 20 апреля 2016 г. анализ основных оптических характеристик аэрозоля показал превышение среднегодового значения $AOT(500) = 0,17$ почти в 2 раза (для 12 апреля максимальное значение $AOT(500) = 0,29$, для 20 апреля максимальное $AOT(500) = 0,39$) и низкие значения параметра Ангстрема (α ниже 0,6 при среднегодовом $\alpha = 1,22$), а также превалирование крупных частиц аэрозоля в атмосфере над черноморским регионом. Такие значения величин подтверждают перенос аридного аэрозоля хотя бы из одного региона пустынь, однако данные обратных траекторий HYSPLIT показали для данных дат перенос исключительно со стороны запада. Сравнительный анализ результатов обратных траекторий двух моделей и оптических характеристик показал, что результаты моделирования HYSPLIT менее достоверны для анализа переносов воздушных масс над черноморским регионом, чем результаты AERONET.

Предложенная ранее методика определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля, основанная на результатах анализа обратных траекторий, опробована на данных обратных траекторий 2016 г. На примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов по данным обратных траекторий двух моделей ВТА AERONET и HYSPLIT проведена статистическая обработка данных по месяцам и по сезонам.

Результаты сравнения данных обработки по двум моделям показали отличие как по месячным, так и по сезонным значениям количества случаев переноса аридного аэрозоля со стороны пустыни Сахара и Сирийской пустыни над черноморским регионом. По результатам ВТА AERONET наиболее интенсивный перенос наблюдается в феврале и в апреле, а по данным HYSPLIT в марте.

Статистическая обработка данных двух моделей дала совпадение только по двум аспектам:

- 1) наибольшее количество переносов со стороны пустыни Сахара над черноморским регионом на трех исследуемых высотах происходит весной в атмосферном столбе от 500 м до 3 км;

- 2) наиболее часто перенос зарегистрирован на высоте 3 км (слой 700 гПа).

Комплексный анализ оптических характеристик и результатов обратных траекторий двух моделей показал, что результаты моделирования HYSPLIT менее достоверны для анализа переносов воздушных масс над черноморским регионом, чем результаты AERONET для случаев пылевых переносов.

Развитый в этом пункте на основе использования ВТА алгоритм определения источников аэрозоля над акваторией Чёрного моря был использован ниже для определения географического положения источника с целью подтверждения его типа, в частности, для пылевого и дымового аэрозоля.

2.3. Оптические характеристики трёх типов аэрозоля над Чёрным морем

2.3.1 Оптические характеристики черноморского аэрозоля. Учитывая географическое положение Чёрного моря, свойства черноморского аэрозоля могут существенно отличаться от океанического [Suslin et al., 2007]. Поэтому одна из задач этого исследования состояла в том, чтобы на основании прямых измерений сети AERONET определить место оптических свойств черноморского аэрозоля среди основных его типов, характерных для земной атмосферы.

В работе были использованы данные сети AERONET (level 2.0): AOT на длине волны 870 нм и параметра Ангстрема для двух спектральных интервалов 440 – 870 нм и 380 – 500 нм. Оба параметра получены с помощью метода Direct Sun Algorithm. Информация о станциях представлена в таблице 2.5. Кроме того, для специальных случаев использовались данные модельных расчётов об обратных траекториях воздушных масс [Schoeberl, Newman, 1995; Pickering, et al., 2001] для севастопольской станции AERONET.

Ниже представлены результаты сравнительного анализа свойств аэрозоля над Чёрным морем с другими районами, используя только измерения сети AERONET. Цель этого анализа состояла в том, чтобы понять какое место занимают оптические свойства черноморского аэрозоля среди их многообразия. Для этого был проведен анализ изменчивости значений аэрозольной оптической толщины на

лине волны 870 нм ($AOT(870)$) и $\alpha(440 - 870)$. Были рассмотрены несколько характерных районов, включая Арктику, Тихий океан, экваториальную область тропических лесов в Бразилии, пустыню Сахару, континентальную часть Сибири и район Чёрного моря (таблица 2.5). Результаты этого сравнения представлены на Рисунке 2.9. Для этой выборки станций чётко выделяются четыре группы аэрозоля: арктический, океанический, пустынный и континентальный. В рассматриваемом классе оптических характеристик черноморский аэрозоль оказался практически идентичен континентальному (станция Tomsk). Несколько неожиданным является результат совпадения свойств континентального аэрозоля со свойствами аэрозоля на станции Manaus EMBRAPA (Бразилия). Единственная отличительная особенность последнего – относительно однородное распределение α для $AOT(870) > 0,1$, в то же время для станций Tomsk и Sevastopol имел место, как минимум, бимодальный характер гистограммы $\alpha(440 - 870)$.

Таблица 2.5 – Информация о станциях сети AERONET, для которых проводился анализ данных [Суслин, и др., 2015]

Название	Руководители работ	Период охвата наблюдениями начало-конец (дд.мм.гггг)	Координаты долгота/широта (град)
Tomsk	B.Holben, M.Panchenko	24.10.2002–20.04.2013	85.047/56.477
Sevastopol	B.Holben	14.05.2006–30.08.2013	33.517/44.616
OPAL	N.O'Neill, I.Abboud, V.Fioletov	01.04.2007–18.09.2013	-85.939/79.990
Galata_Platform	G.Zibordi	12.04.2014–20.07.2014	28.193/43.045
Tahiti	B.Holben	24.07.1999–26.10.2009	-149.606/- 17.577
Gloria	G.Zibordi	25.01.2011–22.02.2014	29.360/44.600
Tamanrasset INM	E. Cuevas-Agullo	30.09.2006–08.12.2012	5.530/22.790
Manaus EMBRAP	P.Artaxo	01.02.2011–28.05.2014	-59.970/-2.891

На Рисунке 2.9 для станции Sevastopol отражено это специфическое свойство на примере двух подмножеств из основной выборки по АОТ(870): $[0,05 - 0,1]$ и $[0,25 - 0,3]$.

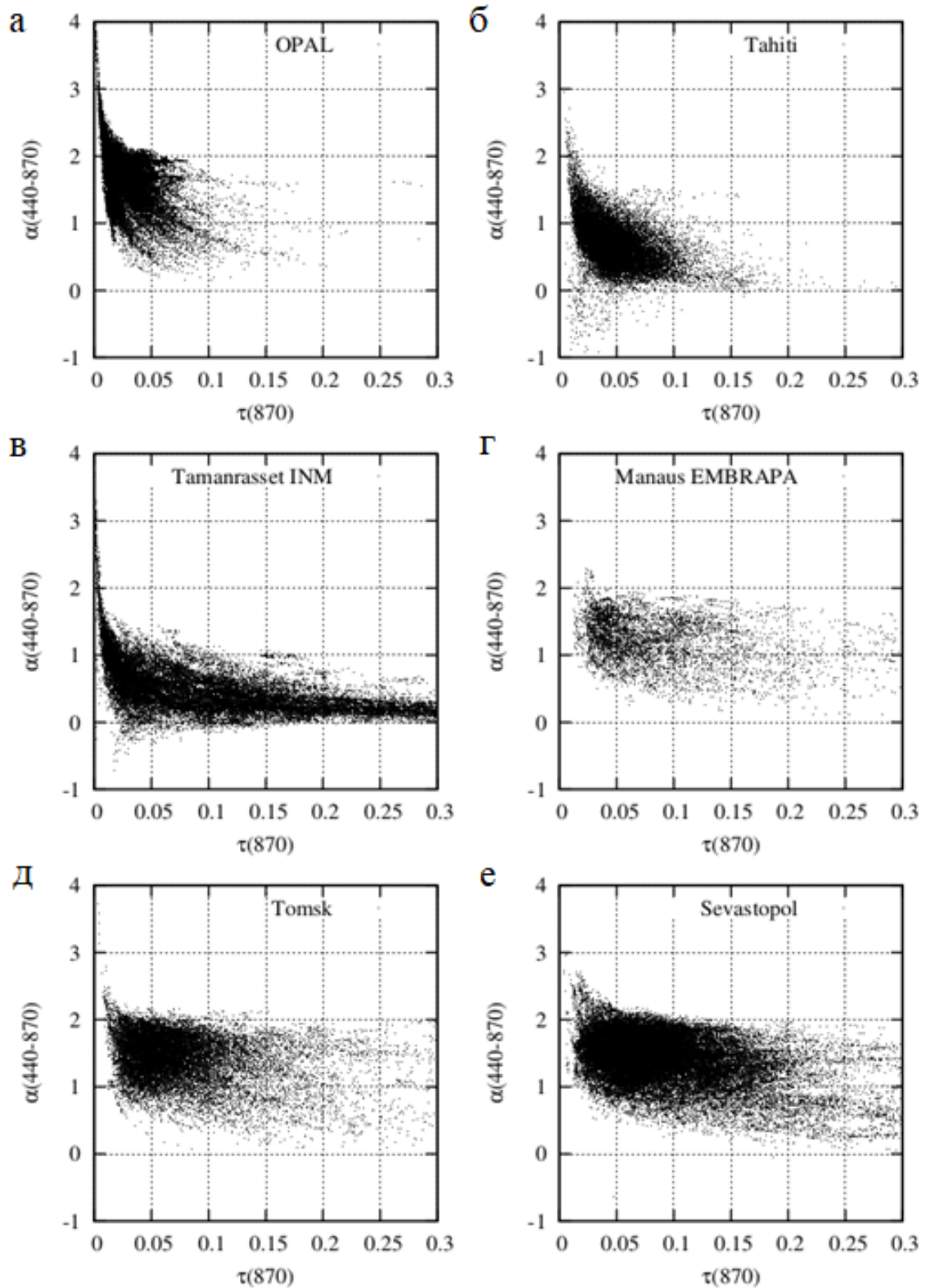


Рисунок 2.9 – Связь между АОТ (870) и α (440-870) за весь период наблюдения по данным сети AERONET для разных районов: Арктика (OPAL) (а), Тихий океан (Tahiti) (б), пустынный район Сахары (Tamanrasset INM) (в), экваториальный район в амазонской сельве (Manaus EMBRAPA) (г), Сибирь (Tomsk) (д) и Чёрное море (Sevastopol) (е) [Суслин, и др., 2015]

Для выявления возможных причин бимодальной структуры гистограммы α для $AOT(870) > 0,1$ были подготовлены две выборки для двух интервалов α : $[1,5 - 2]$ и $[0 - 0,5]$ (Рисунок 2.10).

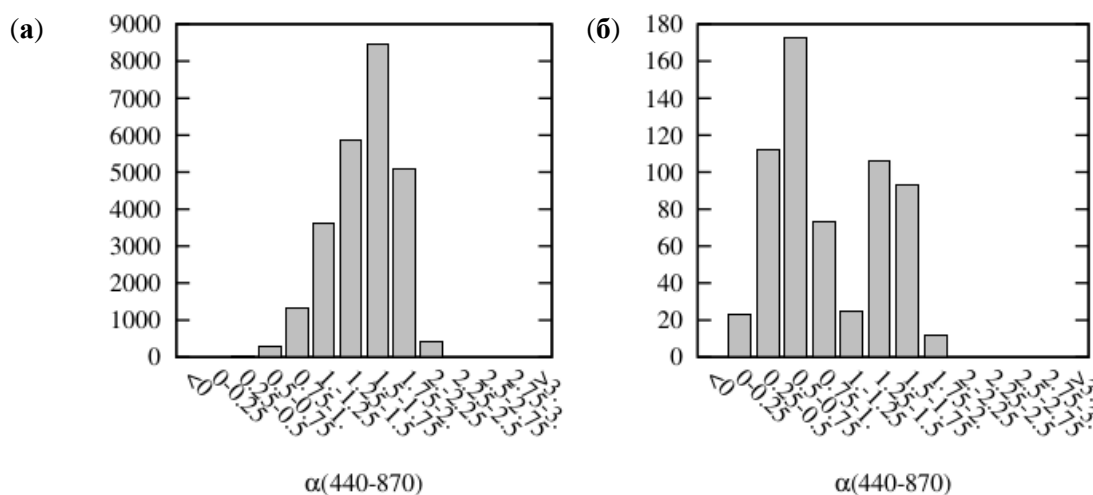


Рисунок 2.10 – Гистограммы α для двух выборок АОТ, полученных по данным севастопольской станции AERONET: (а) $AOT(870) = [0,05 - 0,1]$, $N = 25117$ и (б) $AOT(870) = [0,25 - 0,3]$, $N = 617$, где N – число измерений в каждой выборке [Суслин, и др., 2015]

Анализ трехсуточных данных обратных траекторий воздушных масс для каждой из этих выборок показал, что большим значениям α соответствуют воздушные массы, пришедшие с севера, северо-востока и северо-запада, а малым значениям α – воздушные массы, пришедшие из южного направления: Турции, Аравийского полуострова и пустыни Сахары (Рисунок 2.11). Максимум событий для высоких значений α приходится на май-июнь, для низких значений α – на июль-август. На станциях Gloria и Galata свойства аэрозоля были аналогичные тем, которые получены на станции Sevastopol. Различие заключалось лишь во временном ряде, который для севастопольской станции был существенно больше, что сказалось на плотности событий в аналогичных ячейках на плоскости в координатах ($AOT(870)$, $\alpha(440-870)$) на Рисунке 2.11.

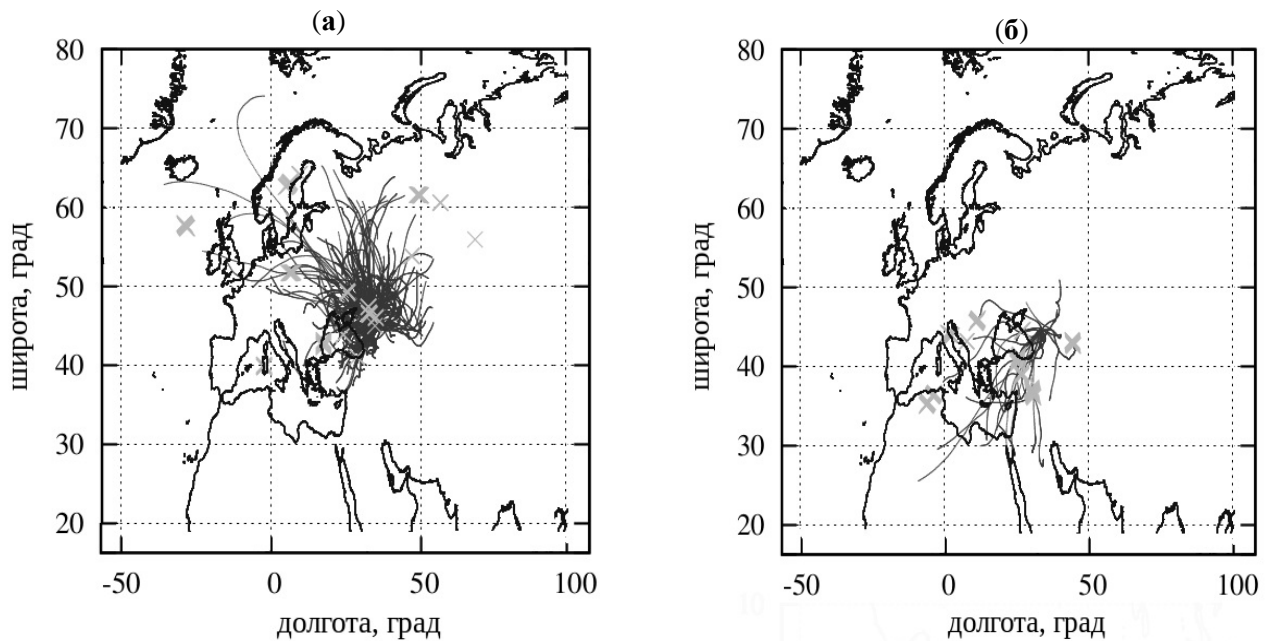


Рисунок 2.11 – Маршруты движения воздушных масс для слоя 800 – 900 мбар (сплошные линии) по данным трехсуточного анализа обратных траекторий и расположение (символы) мест генерации интенсивного подъёма воздушных масс из нижних слоёв атмосферы, определённых по алгоритму для двух выборок по данным севастопольской станции сети AERONET для $AOT(870) > 0,1$:

$$a - \alpha = [1,5 - 2], \quad б - \alpha = [0 - 0,5] \text{ [Суслин, и др., 2015]}$$

Показано, что по основным оптическим характеристикам $AOT(870)$ и α черноморский аэрозоль близок к континентальному. При значениях AOT более 0,1 имеет место бимодальный характер гистограммы α , связанный, как показал анализ обратных траекторий воздушных масс, с разными районами генерации аэрозоля [Suslin, et al., 2007; Schoeberl, et al., 1995; Pickering, et al., 2001].

Формируя специальные выборки для соответствующего типа аэрозоля с помощью процедуры, описанной в п. 2.1, был выполнен анализ AOT , показателя Ангстрема и функции распределения частиц по размерам. Результаты анализа собственно свойств самого черноморского аэрозоля, а точнее для трех его типов: фоновое, пылевое и дымовое приведены ниже.

2.3.2 Оптические характеристики фонового аэрозоля. Средние спектральные зависимости АОТ и параметра Ангстрема, построенные на основе среднесуточных данных для выделенных периодов в годовом ходе, дали возможность получить фоновые для Черного моря характеристики: $\text{АОТ}(500) = 0,22$ и $\alpha = 1,3$. Достаточно хорошее согласие результатов, полученных двумя фотометрами, наблюдается не только для средних величин АОТ, но и для их наиболее вероятных значений. Статистика повторяемости величин $\tau_{0.5}^f$ и τ^c показала, что как для рассматриваемого периода, так и для многолетних данных, более 50 % значений τ^c относится к диапазону 0,01–0,05, а величин $\tau_{0.5}^f$ – к диапазону 0,025 – 0,15.

В данной работе все полученные характеристики атмосферного аэрозоля сравниваются с фоновыми характеристиками, сильное отклонение от которых соотносят с присутствием не типичных (аномальных) для исследуемого региона аэрозолей. На Рисунке 2.12 представлены фоновые значения аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм и отклонения от них вклада мелкой и крупной фракции аэрозоля в общее распределение АОТ за период с 2015 по 2016 гг. На Рисунке 2.13, показано распределение частиц по размерам для фонового аэрозоля и для аэрозоля пыли, который был зарегистрирован над черноморской станцией Eforie сети AERONET.

По фотометрическим данным измерений в Севастополе и экспедициях за исследуемый период получены оптические характеристики, определяющие наличие фонового аэрозоля над исследуемым регионом: $\text{АОТ}(500) = 0,22 \pm 0,05$, $a(440/870) = 1,3 \pm 0,3$, распределение частиц по размерам показывает преимущество мелко-дисперсных частиц (т.е. $dV(r)/d\ln(r) < 1$).

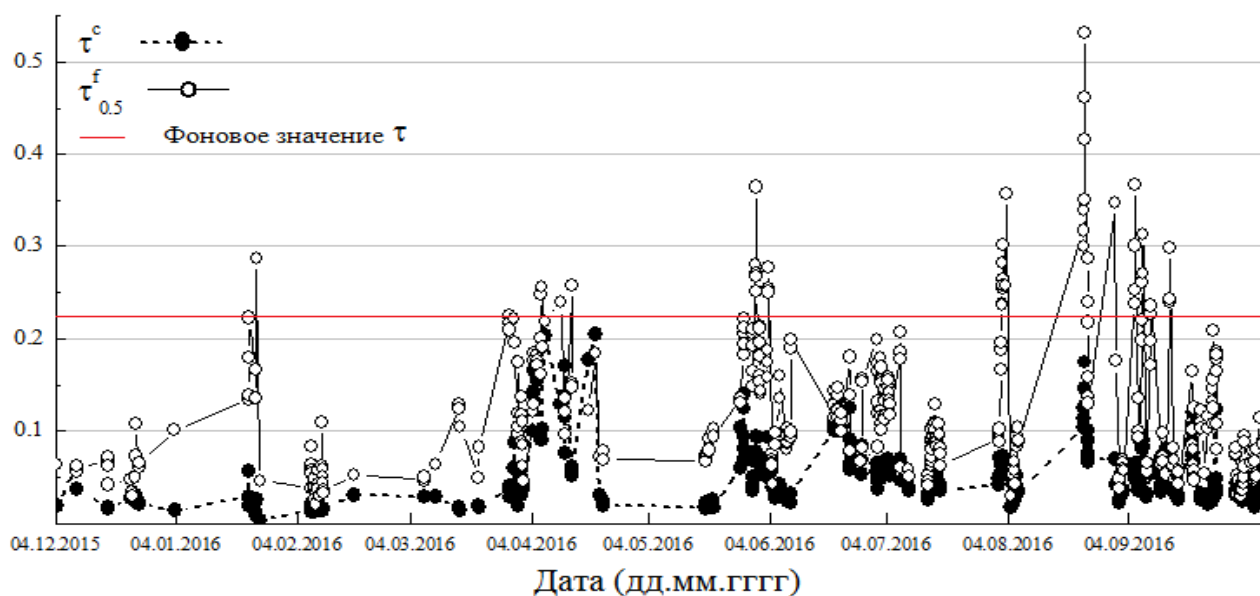
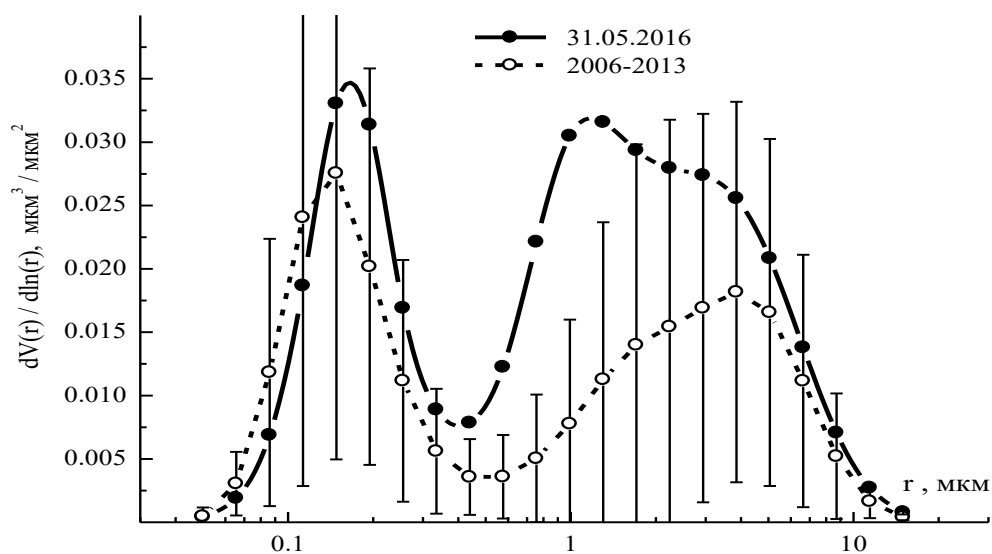


Рисунок 2.12 – Временная изменчивость АОТ грубо- и мелкодисперсного аэрозоля по данным фотометра SPM Севастополь [Калинская, и др., 2017]



(б)

Рисунок 2.13 – Распределение объёмов частиц по размерам за 31.05.2016 (пылевой перенос) на станции Eforie сети AERONET в сопоставлении с фоновым в г. Севастополе в 2006 – 2013 гг. [Калинская, и др., 2017]

2.3.3 Оптические характеристики пылевого аэрозоля, количественный и качественный состав содержания в нем биогенных веществ. Оптические свойства пылевого аэрозоля были установлены на основании анализа измерений на

черноморских станциях сети AERONET, прямых измерений прибором SPM для выборки событий за период с 2006 по 2022 гг., а также данных спутниковых измерений и результатов обратных траекторий перемещения воздушных потоков, полученные с помощью программных комплексов AERONET и HYSPLIT.

Как известно, одним из важных факторов, влияющих на атмосферную диффузию, является процесс загрязнения. Если выбросы содержат крупные частицы аэрозолей, то под действием силы тяжести они осаждаются вблизи источника выбросов или при наличии сильных восходящих потоков могут переноситься на значительные расстояния на большой высоте, постепенно осаждаясь по ходу движения потока [Калинская, 2012]. Вещества, способные адсорбироваться на мелких частицах аэрозолей, с одной стороны, легче подвергаются химическим превращениям, а с другой – могут способствовать коагуляции или служить ядрами конденсации с более быстрым стоком их из атмосферы.

Биогенные вещества, фосфор и кремний входят в состав минеральной пыли пустынь, поэтому именно они могут служить маркерами, подтверждающими наличие переноса пылевого аэрозоля в исследуемый регион [Tréguer, DeLaRocha, 2015].

Среднегодовое за 2010 – 2015 гг. значение концентрации составило $1,22 \mu\text{M}$ для фосфатов и $2,25 \mu\text{M}$ для кремния. При расчете этих величин исключены данные по концентрации SiO_3^{2-} за 2010 г. и PO_4^{3-} за 2015 г. Это связано с тем, что в эти годы были выявлены даты экстремально высоких значений концентраций фосфатов и силикатов. Концентрация PO_4^{3-} 05.06.2015г. составила $408,51 \mu\text{M}$, а 14.09.2010 г. концентрация SiO_3^{2-} составила $284,51 \mu\text{M}$, превышая среднегодовые значения более, чем в 100 раз.

При анализе отобранных проб атмосферных осадков зафиксированы даты с наибольшим содержанием неорганического фосфора и кремния в них. Наибольший интерес представляют случаи, когда концентрация исследуемых веществ превышает среднегодовую величину более чем в 10 раз. Именно для этих случаев (соответствующих дат) проанализированы значения спектрального хода АОТ и спутниковые изображения. В таблице 2.6 представлено количественное содержание PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в атмосферных осадках за исследуемый период.

Таблица 2.6 – Количественное содержание PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} за 2010 – 2014 гг., подтвержденное данными фотометров CIMEL (до 2015 г.) и SPM (с 2015 г. по н.в.) на станции Севастополь [Калинская, и др., 2017]

Дата, дд.мм.гг.	PO_4^{3-} , μM	SiO_3^{2-} , μM	Дата	PO_4^{3-} , μM	SiO_3^{2-} , μM
03.06.2010		20,66	04.09.2014	15,07	4,9
23.06.2010	8,87		01.06.2015	91,33	15,11
14.09.2010		284,51	05.06.2015	408,51	43,76
16.01.2011		11,65	12.06.2015	131,59	15,33
11.02.2012		25,83	19.06.2015	68,05	15,53
30.03.2012		11,61	25.06.2015	16,10	6,25
19.04.2012	2,33	16,22	03.07.2015	24,94	4,07
09.08.2014	19,03	7,4	15.07.2015	41,54	7,42
17.08.2014	24,86	5,5	13.05.2016	27,96	4,29

При анализе Таблицы 2.6 видно, что некоторые значения отличаются в 10 раз, а в исключительных случаях и в 400 раз по сравнению со среднегодовым значением. Полученные данные доказывают, что в Черноморском регионе ежегодно регистрируются аномально высокие концентрации фосфора и кремния, что может привести к негативным последствиям.

Для дат с завышенными значениями концентраций PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} проанализирован массив данных международной сети AERONET для станции Sevastopol на наличие в эти дни измерений основных характеристик атмосферного аэрозоля до и после выпадения осадков. Коэффициент корреляции данных высоких значений АОТ и данных высоких концентраций PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в осадках $R = 0,79$ и $R = 0,73$, соответственно.

При наличии в пробах осадков большого количества крупных частиц (более 5 мкм) возможно типизировать аэрозоль, выпавший в осадок (пылевой, горячей

биомассы и др.), и сравнить получившийся результат с типизацией аэрозоля по данным анализа основных оптических характеристик посредством AERONET.

Анализ величин аэрозольной оптической толщины, полученных на станции Севастополь во время регистрирования повышенных концентраций фосфора и кремния, с величинами АОТ, полученными на других черноморских станциях, показал, что и на других станциях в исследуемые дни наблюдались высокие значения АОТ на всех длинах волн. Таким образом, информация о повышенном содержании биогенных веществ бралась из данных CIMEL [Калинская, и др., 2017] по станциям Galata_Platform (Болгария), Eforie (Румыния), Gloria (Румыния) за 2015 – 2016 гг.

Среднее значение АОТ на длине волны 500 нм за 2007 – 2015 гг. составило 0,22. В то же время значение $\text{АОТ}(500) = 0,52$, полученное как среднее значение для дней с аномально высокими значениями концентраций PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} , более чем в 2 раза превышает среднегодовое значение за весь исследуемый период (Рисунок 2.14).

Для дней с максимальным превышением среднегодового значения концентрации PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} проведен анализ основных оптических характеристик аэрозоля на Черноморских станциях и станциях на побережье Средиземного моря, максимально близко расположенных к Черному морю.

Анализ обратных траекторий для дат с высокой концентрацией PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} проводился по данным международной сети AERONET и модели HYSPLIT.

В пробе атмосферных осадков, отобранных 05.06.2015 г. зарегистрировано превышение среднегодовой концентрации PO_4^{3-} в 400 раз. Для определения причины избытка фосфора в осадках необходимо определить источник переноса данного биогенного вещества за исследуемый день.

Данные обратных траекторий как по модели AERONET, так и HYSPLIT показали наличие переноса со стороны Сирийской пустыни (Рисунок 2.15).

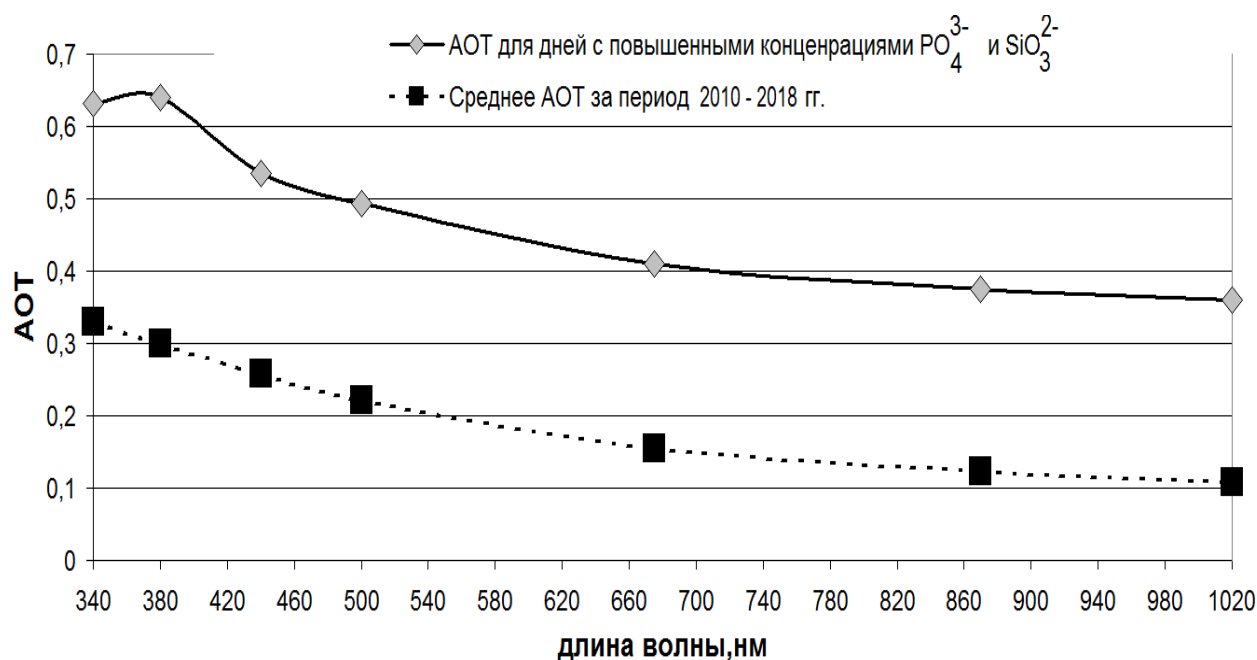
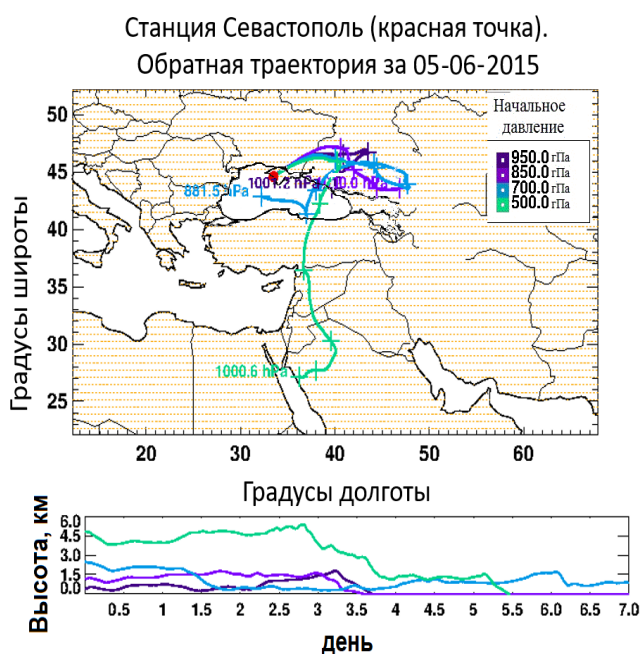
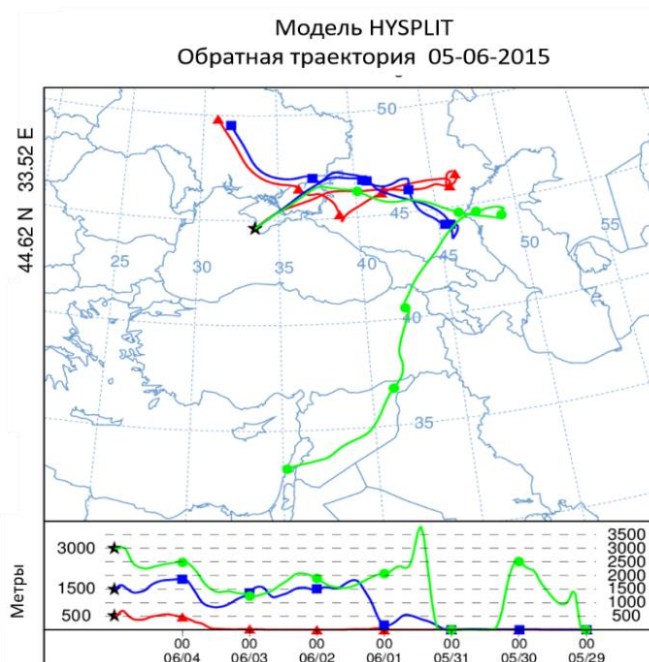


Рисунок 2.14—Среднее значение АОТ в периоды аномально высокого содержания PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в Черноморском регионе за 2010 – 2018 гг. и среднее за весь исследуемый период [Калинская, и др., 2017]



(a)



(б)

Рисунок 2.15 – Обратные траектории перемещения воздушных масс, полученные при помощи модели HYSPLIT (а), семидневные обратные траектории по данным AERONET (б)

Информацию об атмосферной загрузке пылевым аэрозолем можно получить посредством данных изображений со спутника MODIS Aqua, поэтому проанализированы спутниковые снимки за 13.05.2016 г., когда концентрация по PO_4^{3-} превышала среднегодовое значение более чем в 20 раз [Архив MODIS]. На рисунке 2.16 представлено спутниковое изображение, на котором виден перенос аэрозольной массы, в которой определено значительное количество пылевого аэрозоля.

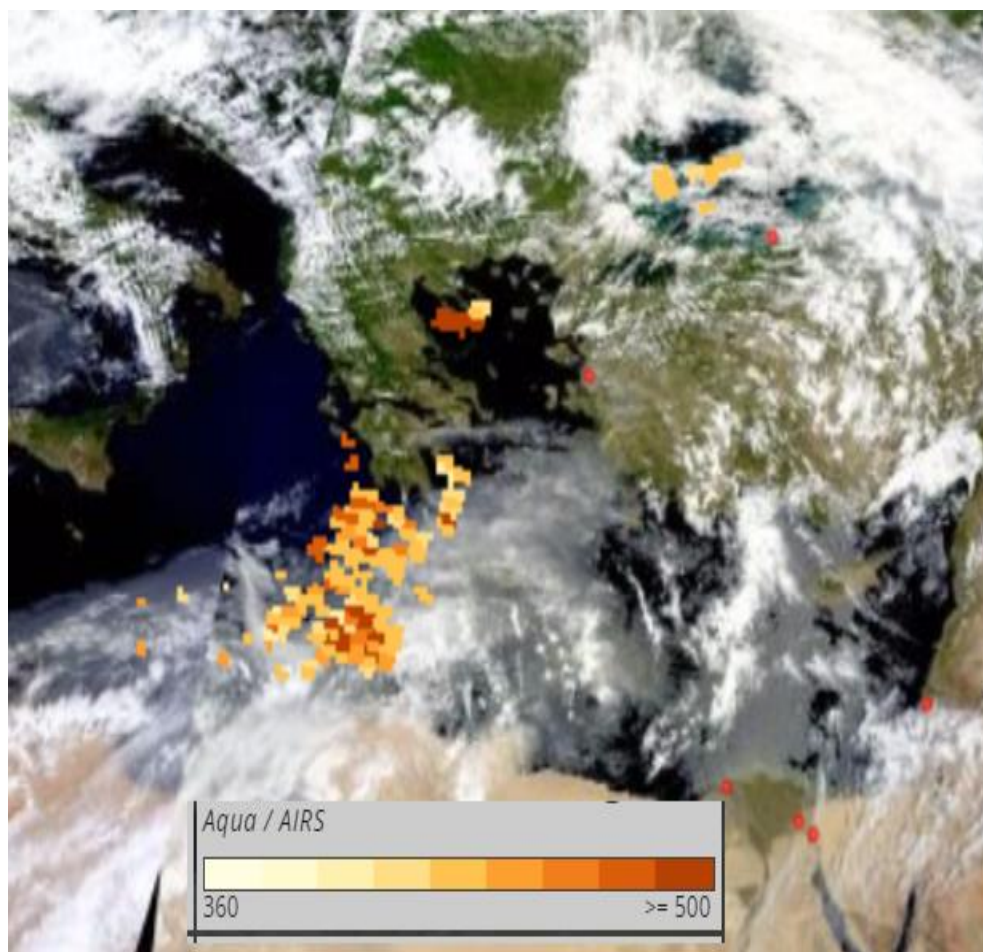


Рисунок 2.16 – Спутниковое изображение переноса пылевого аэрозоля (пылевой загрузки) со стороны Сахары, зарегистрированного инфракрасным зондом AIRS на борту спутника MODIS Aqua 13.05.2016 г. [Калинская, и др., 2017]

В Таблице 2.6 максимальное значение концентрации SiO_3^{2-} за весь исследуемый период наблюдалось 14.09.2010 г. Анализ обратных траекторий по данным AERONET [Архив AERONET] и HYSPLIT [Архив HYSPLIT] показал наличие переноса со стороны пустыни Сахара в этот день (Рисунок 2.17).

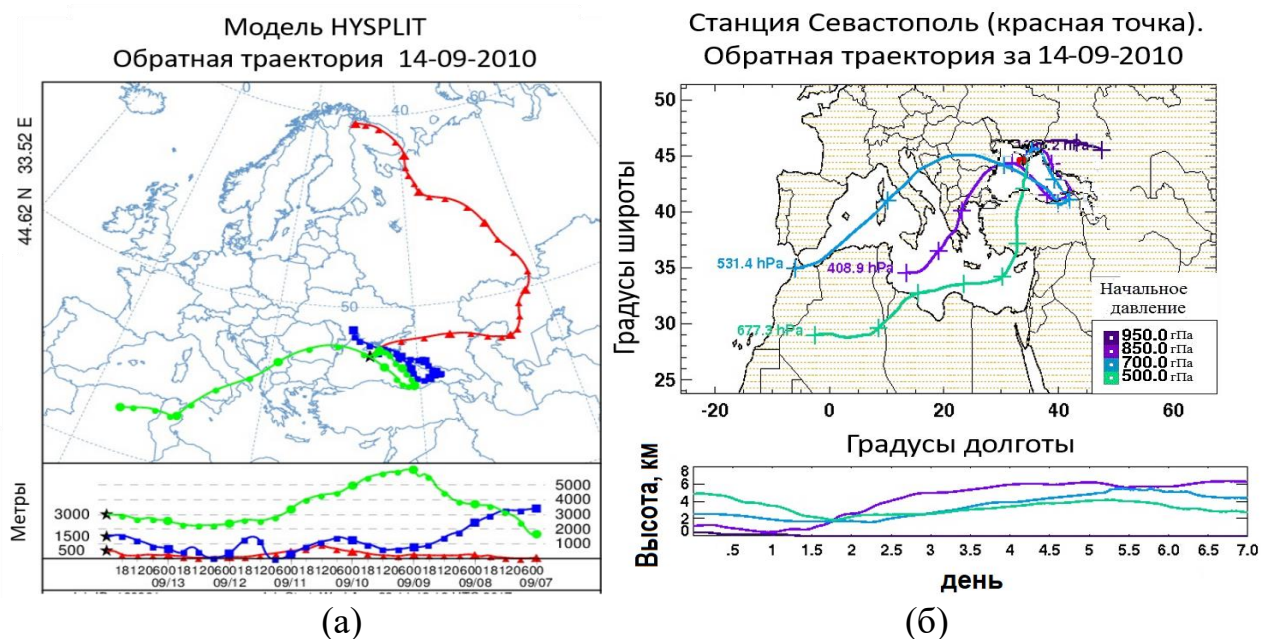


Рисунок 2.17 – Обратные траектории перемещения воздушных масс, полученные при помощи модели HYSPLIT (а); семидневные обратные траектории по данным AERONET (б) [Калинская и др., 2017]

Анализ основных оптических характеристик за 14.09.2010 г. и предыдущие дни показал, что наибольшие значения АОТ в этом месяце наблюдались 09.09.2010 г. (среднедневное значение $AOT(500) = 0,52$, при $\alpha = 1,7$), 13.09.2010 г. (среднедневное значение $AOT(500) = 0,6$, при $\alpha = 0,5$) и 14.09.2010 г. (среднедневное значение $AOT(500) = 0,4$, при $\alpha = 1,3$). Как видно за 2 выбранных дня параметр Ангстрема был равен фоновому значению, либо превышал его, а за 13.09.2010 г. в атмосфере находились преимущественно крупные аэрозольные частицы, т.к. значения α ниже среднемесячных ($\alpha = 1,2$) более, чем в 2 раза. Значения АОТ за все три дня более чем в 2 раза больше среднегодового значения на длине волны 500 нм за исследуемый период.

Ранее [Калинская, 2012] показано, что перенос пылевого аэрозоля может наблюдаться не только в течение суток, но и на протяжении 3 – 7 дней. Поэтому проявление экстремумов за неделю до 14.09.2010 г. подтверждает наличие сильного переноса пылевого аэрозоля в исследуемый регион.

Наличие крупных аэрозольных частиц в атмосфере можно определить по изменчивости параметра Ангстрема (α) – чем ниже значения α , тем более крупные частицы можно обнаружить в атмосфере над исследуемым регионом [Кондратьев, 1989]. Среднегодовое значение параметра Ангстрема за исследуемый период составило 1,22, однако за 13.09.2010 г. $\alpha = 0,51$, что соответствует преимущественному содержанию крупнодисперсной взвеси. Анализ кривой распределения частиц по размерам также подтверждает наличие крупных аэрозольных частиц в этот день (Рисунок 2.18).

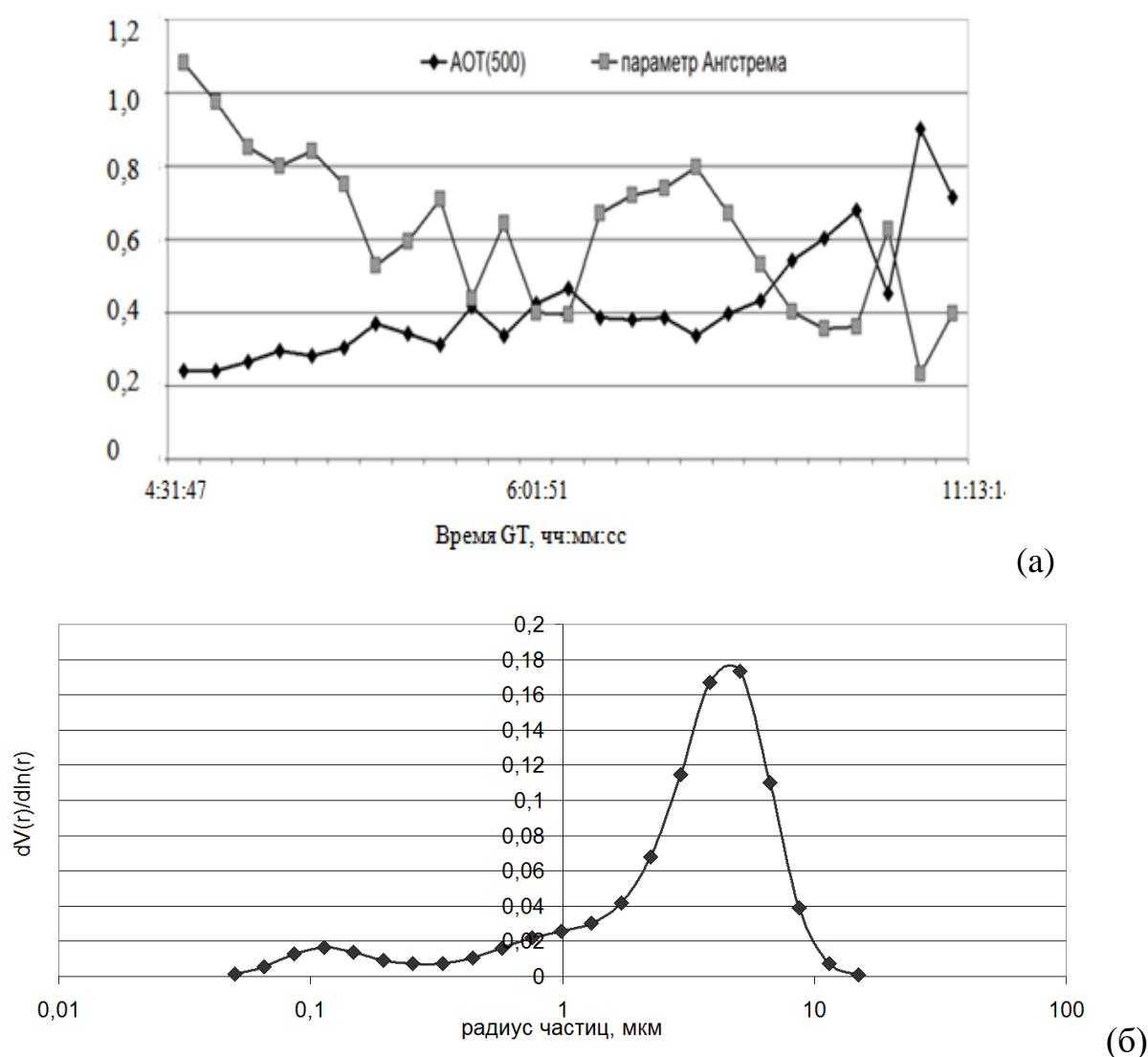


Рисунок 2.18–Дневное распределение AOT(500)и параметра Ангстрема за 13.05.2016 г.(а), распределение частиц по размерам за 13.05.2016 г. (б)

[Калинская и др., 2017]

Поскольку максимальное значение концентрации SiO_3^{2-} наблюдалось 14.09.2010 г., а наличие крупных аэрозольных частиц подтвердилось 13.09.2010 г. можно сделать вывод, что за сутки с момента регистрации интенсивного переноса аэрозоль выпал в осадок на подстилающую поверхность черноморского региона. Комплексный анализ АОТ, а также данных обратных траекторий по результатам моделей AERONET и HYSPLIT подтвердил, что наблюдавшиеся в атмосферных осадках повышенные концентрации PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} , превышающие среднегодовое значение более чем в 10 раз, в 100% случаев определялись переносом пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара и Сирийской пустыни.

Анализ полученных данных по содержанию PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в пробах атмосферных осадков, отобранных в районе Крымского побережья, показал, что при экстремальных значениях основных оптических характеристик аэрозоля (высоких значений АОТ и низких значений параметра Ангстрема) наблюдаются повышенные значения содержания PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} .

В результате исследований определено, что концентрация фосфатов и силикатов при переносе пылевого аэрозоля в исследуемый регион может повышаться более чем в 10 раз. Комплексный анализ АОТ, а также обратных траекторий по результатам моделей AERONET и HYSPLIT подтвердил, что наблюдавшиеся в атмосферных осадках повышенные концентрации PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} , превышающие среднегодовое значение более чем в 10 раз, в 100% случаев определялись переносом пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара и Сирийской пустыни. При анализе результатов выяснилось, что средняя концентрация фосфатов и силикатов в открытом осадкосборнике превышала концентрацию в закрытом в среднем в 3,8 раза. При этом получены данные, когда превышение концентрации исследуемых биогенных элементов в открытом осадкосборнике составляло практически два порядка.

Так для региона Чёрного моря для пылевого аэрозоля имеем $\text{АОТ} > 0,3$, $\alpha < 0,8$; в распределении частиц по размерам показано доминирование крупных частиц ($dV(r)/d\ln(r) > 1$).

2.3.4 Оптические характеристики дымового аэрозоля (сажа), количественное и качественное содержание в нем биогенных веществ. Для проведения статистического анализа данных о пожарах в системе FIRMS для региона Чёрного моря была выделена исследуемая область (Рисунок 2.19, а, б). Разница по количеству точек возгорания по данным MODIS оказалась в 3 раза меньше, чем по данным VIIRS, что хорошо видно при сравнении годового распределения данных (Рисунок 2.19, в) и на среднемесячных данных (Рисунок 2.19, г) и картах распределения источников пожаров по данным каждого спутника в отдельности (Рисунок 2.19, а, б).

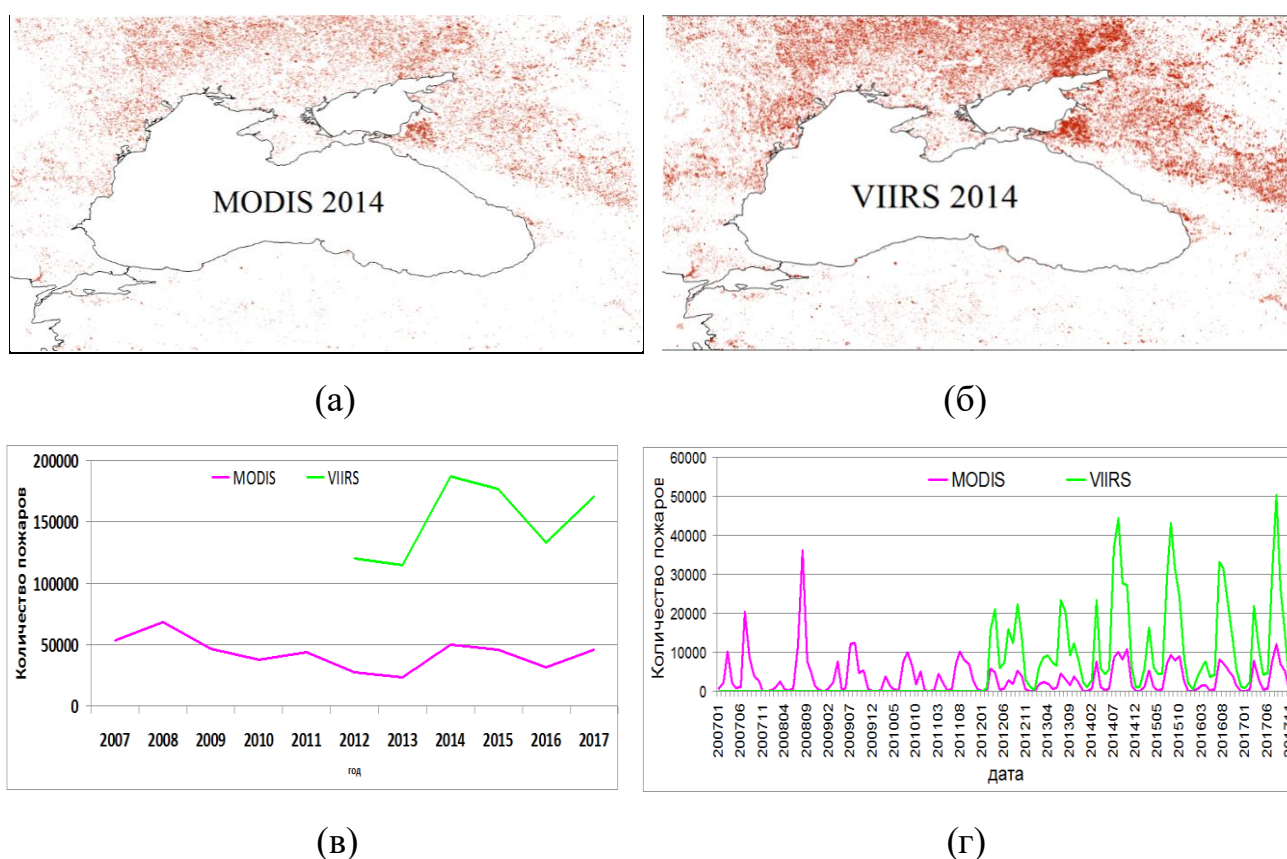


Рисунок 2.19 – Карты распределения источников пожаров за 2014 г. по данным MODIS (а) и VIIRS (б). Годовое (в) и среднемесячное (г) распределение количества точек возгорания по данным MODIS и VIIRS за период 2007 – 2018 гг. [Калинская, Рябоконь, 2019]

Проведённый анализ массива данных FRP [Архив FIRMS] за период 2007 – 2018 гг. по двум спутникам MODIS и VIIRS показал, что данные FRP по MODIS отличаются более высокими показателями (Рисунок 2.20): за исследуемый период пиковое значение FRP по данным MODIS достигало 3335,6 МВт, а по данным VIIRS максимальное значение FRP = 610,2 МВт.

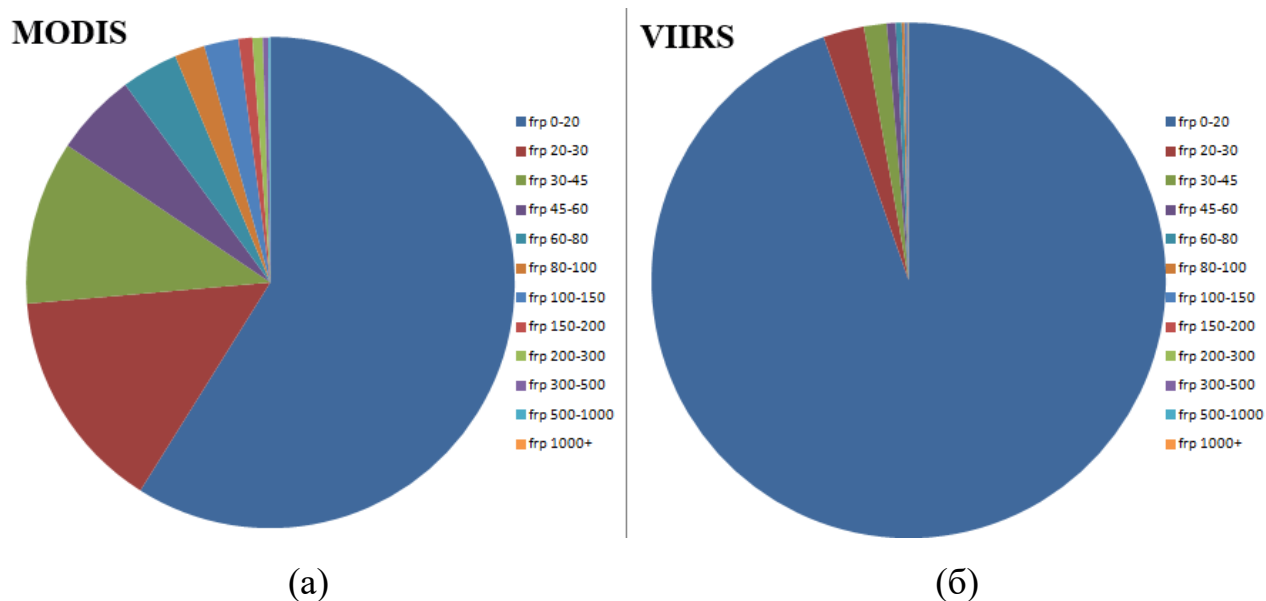


Рисунок 2.20 – Диаграмма частотного распределения данных FRP по спутникам MODIS (а) и VIIRS (б) за период 2007 – 2018 гг.

[Калинская, Рябоконь, 2019]

Проанализирован массив данных FRP с 2007 по 2018 гг., в котором выявлены годы максимальной и минимальной активности распространения пожаров над Черноморским регионом. Меньше всего тепловых аномалий выявлено в 2013 г. (23503 точки), а больше всего аномальных температур 2008 г. (68780 точек). Самыми активными днями по количеству пожаров являются 08.08.2008 г. по данным MODIS, когда количество точек возгораний составило 2329 и 03.08.2014 г. – 3767 точек возгорания по данным VIIRS. По результатам комплексного анализа данных MODIS и VIIRS максимальное число точек возгораний (4493 точки) было получено 03.08.2014 г. (Рисунок 2.21, Таблица 2.7).

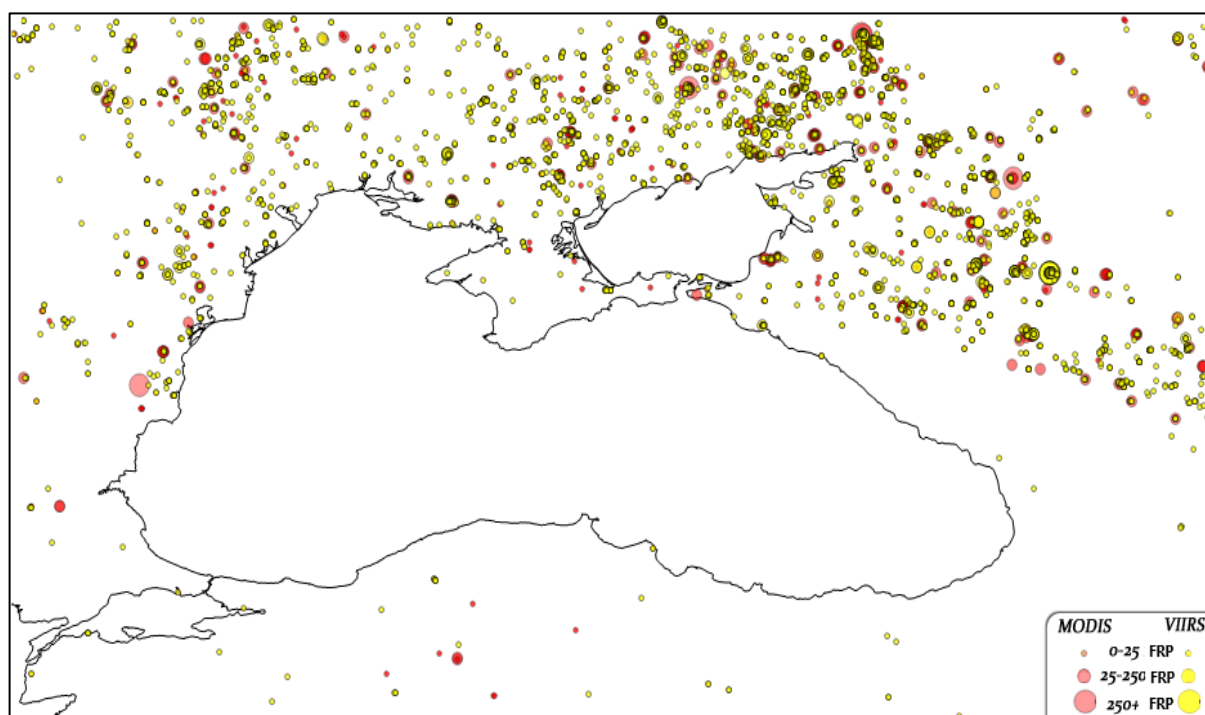


Рисунок 2.21 – Схема распределение точек возгорания за 03.08.2014 г.
(по данным VIIRS самый многочисленный по количеству пожаров день
(3767 точек возгорания) [Калинская, Рябоконь, 2019]

Количественный анализ данных по пожарам спутников MODIS и VIIRS показал отличия как в годовых, так и в среднемесечных и дневных значениях (Таблица 2.7).

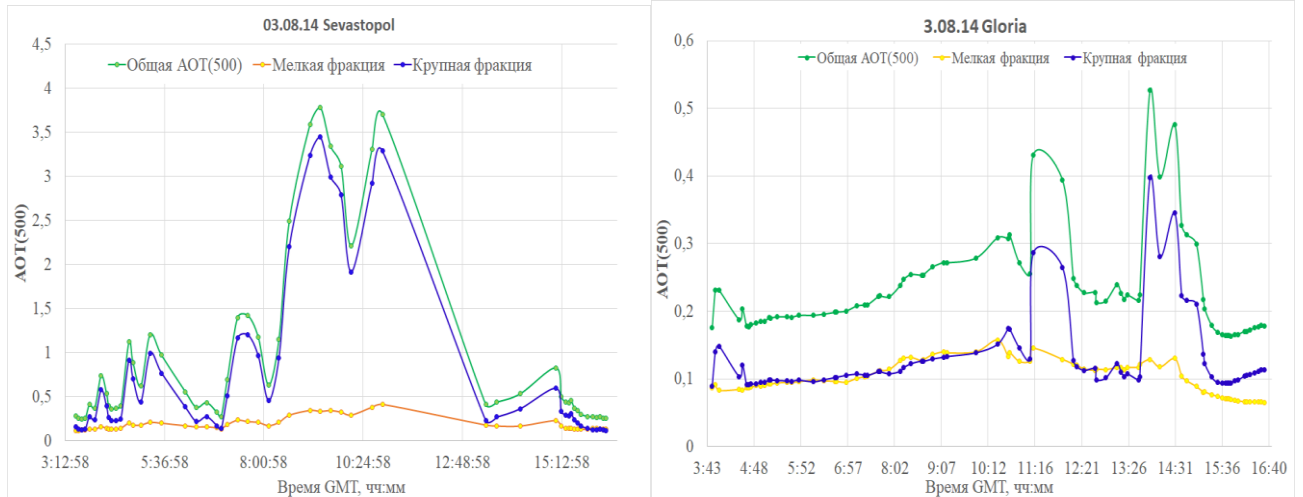
Таблица 2.7–Анализ данных о пожарах по данным двух спутников Aqua MODIS и VIIRS [Калинская, Рябоконь, 2019]

По годам:	MODIS		VIIRS	Суммарно
активный	2008		2014	2014
неактивный	2013		2013	2013
	по месяцам:			
активный	Август 2008		Август 2017	Август 2017
неактивный	Декабрь 2007		Январь 2012	Декабрь 2007
	по дням:			
активный	04.08.2008		03.08.2014	03.08.2014
неактивный	05.01.2007		07.01.2013	05.01.2017

Сажа, как побочный продукт горения, поглощает заметную долю падающей солнечной радиации, а значит и влияет на величину АОТ атмосферы над исследуемым регионом. Также сажа способна повышать продуктивность растений за счет увеличения рассеянной радиации [Rap, et al., 2015]. Для оценки масштабов распространения сажи и горящей биомассы проанализированы данные основных оптических характеристик и обратных траекторий переноса воздушных масс как для Севастополя, так и для соседних станций AERONET: Galata_Platform (Болгария), Eforie и Gloria (Румыния) [Архив AERONET]. Как показано в Таблице 2.7, самыми активными по количеству пожаров датами за исследуемый период являются 03–04.08.2014 г. Анализ данных аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм ($AOT(500)$) за 03.08.2014 г. над Севастополем показал высокие значения $AOT(500) = 0,95$, что превышает среднее фоновое значение (по данным AERONET $AOT(500) = 0,22$) для Черноморского региона более чем в 4 раза. Анализ данных параметра Ангстрема за 03.08.2014 г. $\alpha = 0,43$, при среднемесечном значении за август $\alpha = 1,3$, а распределения частиц по размерам за тот же день показал преимущество крупных аэрозольных частиц как над Севастополем (Рисунок 2.22, а), так и над станциями западной акватории Черного моря (Рисунок 2.22, б, в).

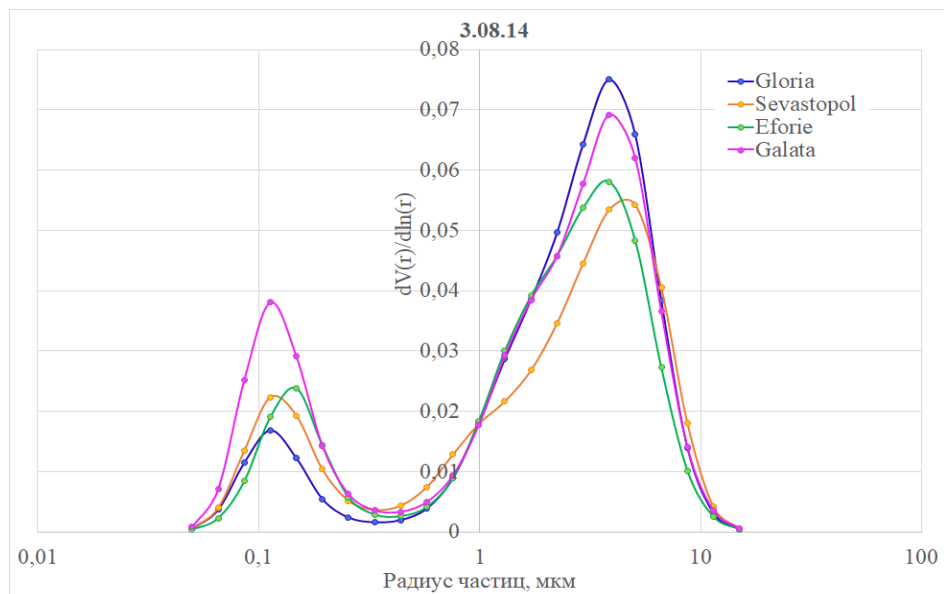
Исследование возможного источника переноса крупных аэрозольных частиц по данным моделирования обратных траекторий AERONET, а также по спутниковым изображениям показал, что область интенсивного возгорания и задымления расположена на северо-востоке (Донецкий регион) от Черноморского региона.

Над регионом Чёрного моря в разные периоды года преобладают ветры северо-западного, западного и юго-западного направлений, связанные с циркуляцией в умеренных широтах северного полушария. Анализ данных обратных траекторий показал нетипичный для Черноморского региона перенос аэрозоля с северо-востока в исследуемый регион на двух высотах в приземных слоях до 1,5 км (Рисунок 2.23) для 3 станций AERONET (для станции Galata_Platform семидневные обратные траектории не представлены на сайте).



(a)

(б)



(в)

Рисунок 2.22 – Общее распределение AOT(500) за 03.08.2014 г. на станции Sevastopol (a), на станции AERONET Gloria (б), распределение частиц по размерам на четырёх Черноморских станциях(в) [Калинская, Рябоконь, 2019]

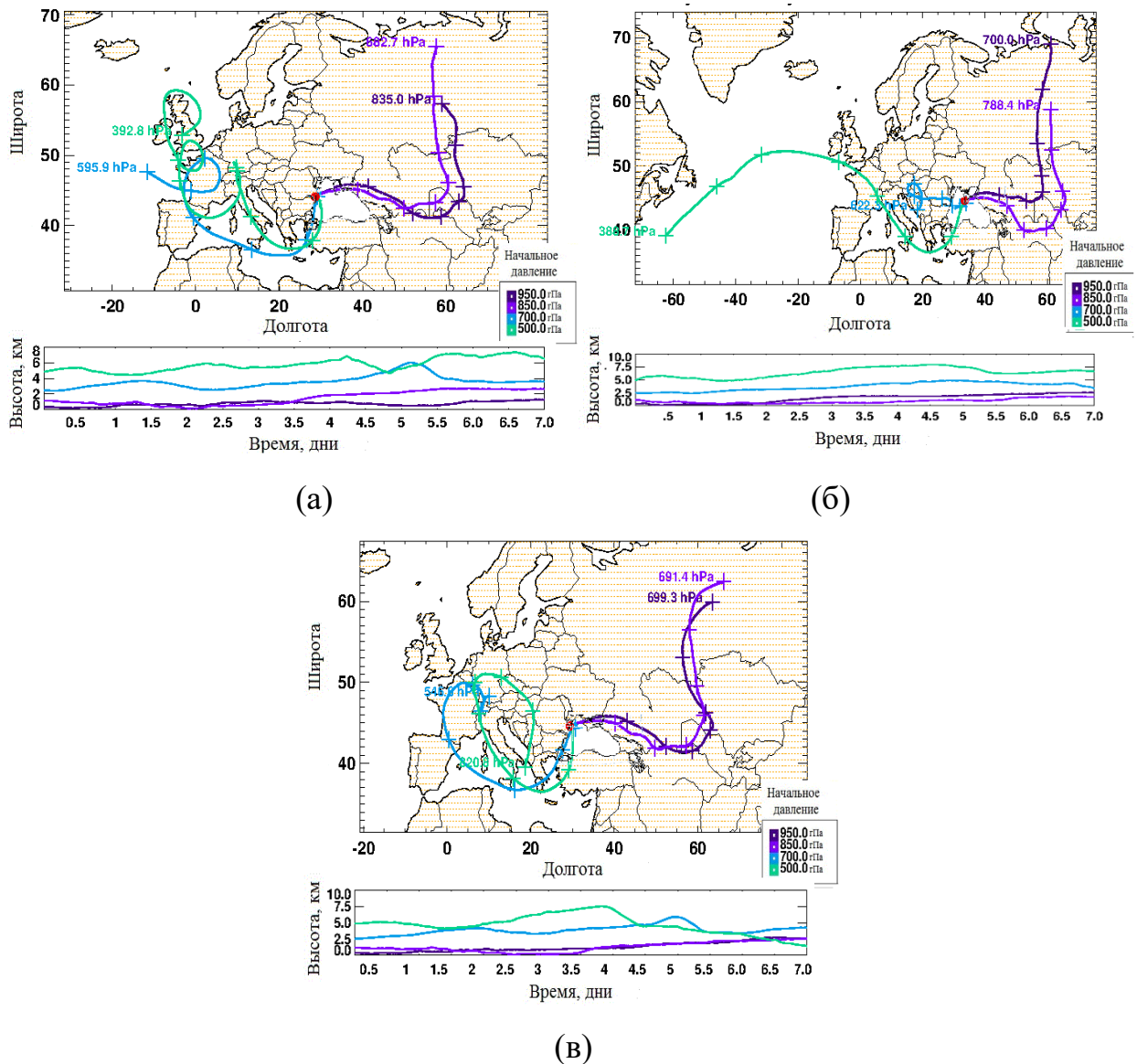


Рисунок 2.23 – Результаты данных 7-ми дневных обратных траекторий по результатам моделирования AERONET за 03.08.2014 г.: а) на станции Sevastopol, б) на станции Eforie, в) на станции Gloria [Калинская, Рябоконь, 2019]

Комплексный анализ изменчивости основных оптических характеристик с 2007 по 2018 гг. в совокупности с исследованием спутниковых изображений и переносов воздушных масс, позволил выявить периоды и даты максимального воздействия на атмосферу аэрозоля горящей биомассы, возникшей вследствие пожаров, регистрируемых на побережье и ближних к Черноморскому региону территориях. Определение возможного источника переноса за день, когда было зарегистрировано наибольшее за исследуемый период количество точек возгорания по

данным двух спутников MODIS и VIIRS, показало, что область интенсивного возгорания и задымления расположена на северо-востоке (Донецкий регион) от Черноморского региона.

Одной из причин увеличения концентрации различных микрочастиц в атмосфере над Черноморским регионом является перенос аридного типа аэрозоля и аэрозоля горящей биомассы, образовавшегося вследствие пожаров. Показать влияние переноса аэрозоля на изменчивость оптических свойств атмосферы над исследуемым регионом возможно, определив даже невысокие превышения концентрации биогенных элементов в атмосферных осадках [Калинская и др., 2020].

Проанализирован массив данных FRP с 2007 по 2019 гг., в котором выявлены периоды максимальной и минимальной активности распространения пожаров над Черноморским регионом. Пожароопасным для Крымского региона и Черноморского побережья в целом является весь летний период, максимум по количеству и интенсивности пожаров которого приходится на август.

Анализ данных системы FIRMS показал, что весь 2017 г. являлся аномально активным как с точки зрения интенсивности, так и по количеству пожаров, регистрируемых на побережье и ближних к Черноморскому региону территориях. Анализ данных АОТ за август 2017 г. над Черным морем показал высокие значения, которые превышали фоновое значение более, чем в 4 раза, при этом значения параметра Ангстрема были близки к фоновым значениям ($\alpha = 1,2$).

В Таблице 2.8 представлены даты и соответствующие им значения концентрации неорганического азота в атмосферных осадках за летний период 2017 г. Средневзвешенная величина концентрации азота за 2017 г. в пробах из закрытого осадкосборника составила 78,55 мкмоль/л, из открытого – 91,93 мкмоль/л. Из представленной таблицы видно, что концентрации неорганического азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) в пробах осадков превышали средневзвешенную величину в 1,5–2 раза.

Таблица 2.8 – Временная изменчивость концентрации неорганического азота за летний период 2017 года [Калинская и др., 2020]

Дата, дд.мм.гг	Концентрация неорганического азота, мкмоль/л.	
	Закрытый осадкосборник	Открытый осадкосборник
19.06.2017	169,20	240,65
24.06.2017	214,84	195,50
24.06.2017	69,10	71,67
04.07.2017	197,34	203,04
04.07.2017	194,84	230,60
04.07.2017	186,08	221,67
07.07.2017	126,15	152,64
19.07.2017	94,31	134,44
23.07.2017	44,47	44,74
28.07.2017	77,41	113,01
29.07.2017	33,81	36,74
15.08.2017	75,76	117,43
18.08.2017	82,18	75,96
21.08.2017	124,47	149,00

Как видно из Таблицы 2.8, максимальные значения концентрации неорганического азота в открытом осадкосборнике получены за 19.06.2017 г., а в закрытом осадкосборнике за 24.06.2017 г. Чтобы определить тип аэрозоля за эти дни проведён анализ спутниковых данных CALIPSO (Рисунок 2.24) [Архив CALIPSO]. По спутниковым данным за 19.06.2017 г. и за 24.06.2017 г. над Чёрным морем зарегистрирован аэрозоль дыма, что подтверждает перенос горячей биомассы от пожаров в исследуемый регион в эти дни.

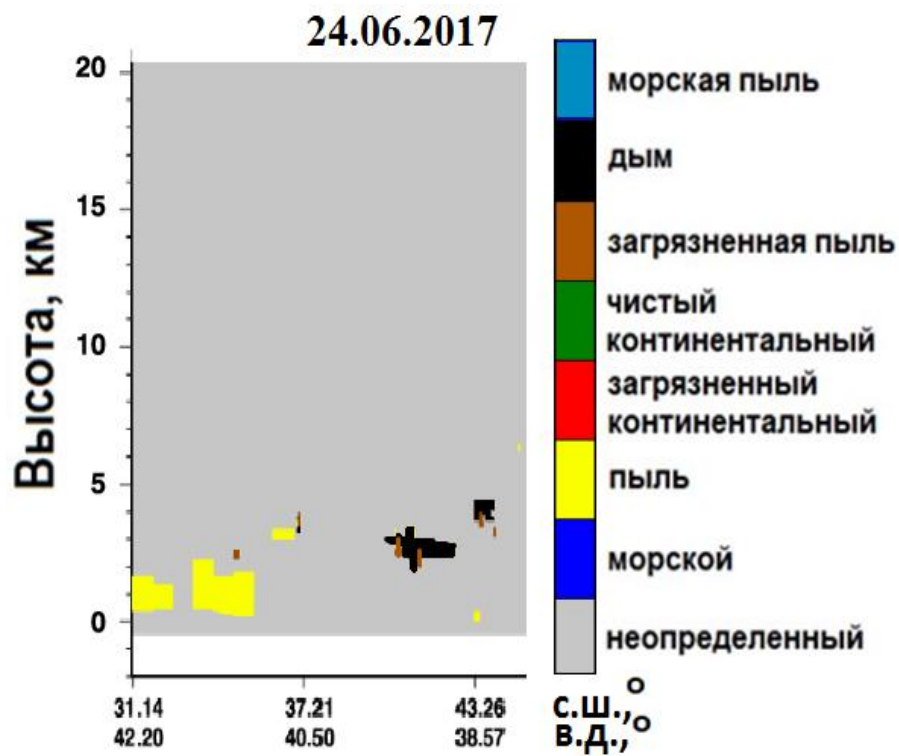
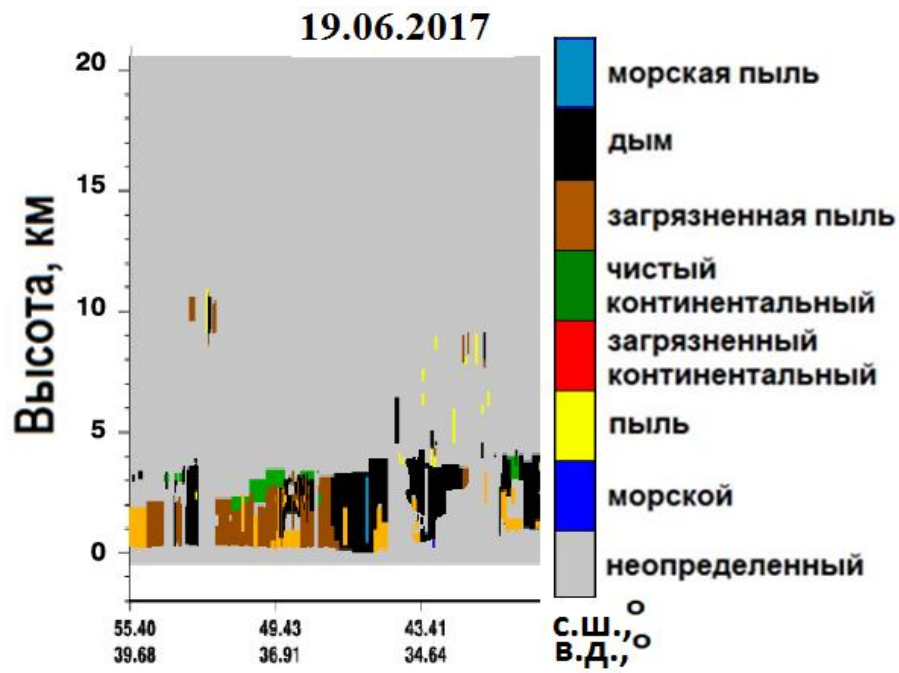


Рисунок 2.24 – Типы аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO за 19.06.2017 г. (а); за 24.06.2017 г. (б) [Калинская и др., 2020]

Так для региона Чёрного моря имеем для дымового аэрозоля для дымового аэрозоля $AOT = 0,27 \pm 0,03$, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$; в распределении частиц по размерам в случае наличия дыма в атмосфере показало преимущество мелкодисперсных частиц ($dV(r)/d\ln(r) < 1$).

В результате пожаров высокая температура делает возможным протекание реакций окисления молекулярного азота с образованием его солевых форм (NO_2 и NO_3), которые, в последствии выпадая в осадок, являются дополнительным источником ускорения роста фитопланктона.

Выводы к главе 2

На основе исследований, проведенных в главе 2, можно сделать следующие выводы:

1) По прямым фотометрическим измерениям получены оценки величин АОТ, показателя Ангстрема и функции распределения частиц по размерам для трех основных типов черноморского аэрозоля: фонового ($AOT = 0,22 \pm 0,05$, $\alpha = 1,3 \pm 0,3$); пылевого ($AOT > 0,3$, $\alpha < 0,8$); дымового ($AOT = 0,27 \pm 0,03$, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$). При наличии фонового аэрозоля и дыма в атмосфере преобладают мелкодисперсные частицы ($dV(r)/d\ln(r) < 1$), для пылевого – крупные частицы ($dV(r)/d\ln(r) > 1$). Показано, что для интенсивной фазы переноса пылевого аэрозоля характерны высокие значения аэрозольной оптической толщины и низкие (> 1) значения параметра Ангстрема.

2) Предложен алгоритм определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля, основанной на массиве данных ВТА. На его основе: для Севастопольского региона посчитаны статистические характеристики источников приземного аэрозоля, влияющие на оптические свойства аэрозоля над морской поверхностью; получены межгодовая и сезонная изменчивости источников аэрозоля с учетом типа подстилающей поверхности (вода/суша); построены среднегодовые карты плотности источников приземного аэрозоля за период с 2007 по 2012 гг.

3) По данному алгоритму для региона Черного моря выделены периоды и даты максимального воздействия на атмосферу пылевого и дымового аэрозоля, возникшие вследствие бурь или пожаров соответственно.

4) Показано, что при преобладании в атмосфере дымового аэрозоля в летний период в атмосферных осадках зафиксированы максимальные значения концентрации неорганических форм азота в отличие от пылевого аэрозоля, когда в атмосферных осадках преобладали фосфаты и кремний.

Представленные в главе 2 результаты исследований опубликованы в [Калинская, Суслин, 2015; Калинская и др., 2018; Калинская и др., 2019; Калинская, Рябонь, 2019; Kalinskaya, et al., 2020; Калинская и др., 2020].

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ НА БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЧЁРНОГО МОРЯ

3.1 Влияние пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря с использованием только спутниковых данных

3.1.1 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя вод Чёрного моря за 2010 год. Некоторые исследователи считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над определенными океаническими областями и регионами, где концентрации пыли высоки [Koren, et al., 2006; Kubilay, 2003]. В главе рассматриваются случаи присутствия значительного количества пыли в атмосфере над регионами Чёрного моря, переносимой из пустынь. Показано влияние пыли на результаты дистанционного определения спектрального состава выходящего из моря излучения. Представлен анализ эффектов возрастания биопродуктивности моря вследствие осаждения пыли из атмосферы в водную среду. Рассчитано характерное время усвоения биогенных веществ, входящих в состав пылевого аэрозоля, фитопланктоном [Young, et al., 1991].

Анализ изменчивости значений основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля за сентябрь 2010 года показал, что начало пылевого переноса было зарегистрировано 09.09.2010 г. В данном пункте представлен результат анализа предоставляемых NASA данных (std NASA) [Архив AERONET; Архив GIOVANNI] о распределении концентрации хлорофилла-а в верхнем слое Чёрного моря, чтобы оценить влияние дополнительного поступления питательных веществ в верхний слой акватории, благодаря выпадению в осадок пылевого аэрозоля для вышеописанных случаев. Известно, что изменение концентрации хлорофилла-а в верхнем слое вод может быть обусловлено процессом апвеллинга, поэтому параллельно проведён анализ температуры поверхности моря для выделенных дат. Максимальное значение концентрации кремниевой кислоты за весь период исследований наблюдалось 14.09.2010 г. в пробе, отобранной в пгт Кацивели и по данным

обратных траекторий определено, что за этот день зарегистрирован перенос воздушных потоков со стороны пустыни Сахара. При изучении карт распределения концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое Чёрного моря до и после выпадения осадков в районе прохождения пылевых воздушных масс (Рисунок 3.1 а, б) отмечен рост концентрации и увеличение масштабов цветения.

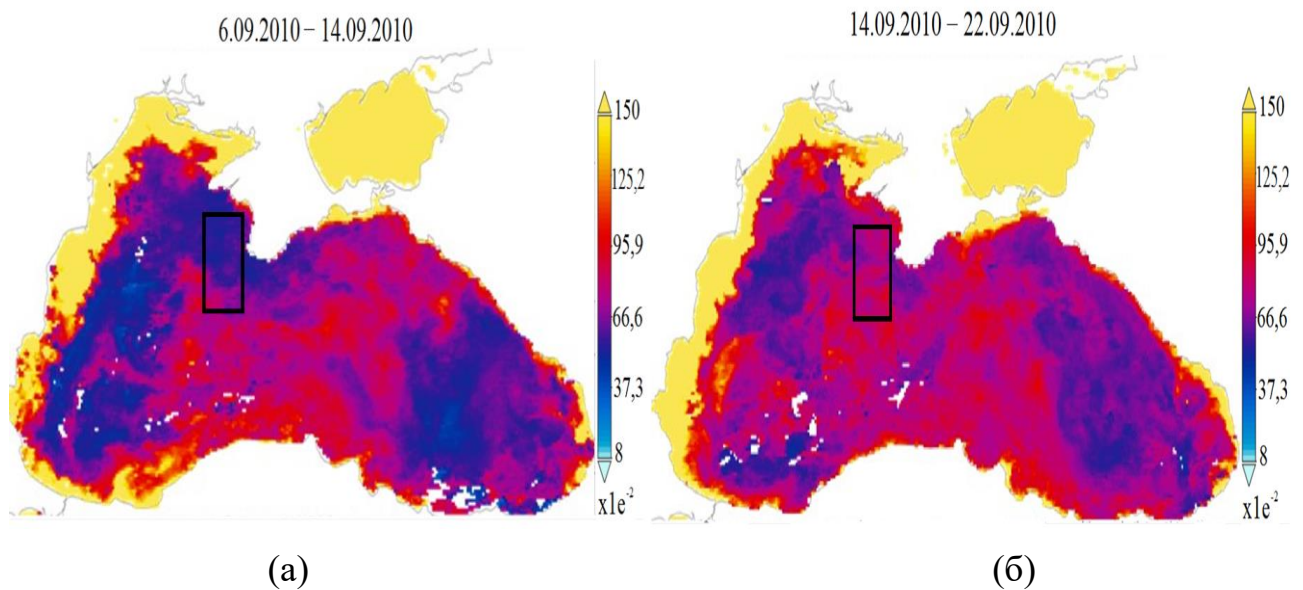


Рисунок 3.1 – Изменчивость концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Чёрного моря до выпадения атмосферных осадков (а) и после (б) по данным спутников NASA [Varenik, Kalinskaya, 2021]

Численно величину изменения концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое моря в рассматриваемый период можно увидеть на Рисунке 3.2.

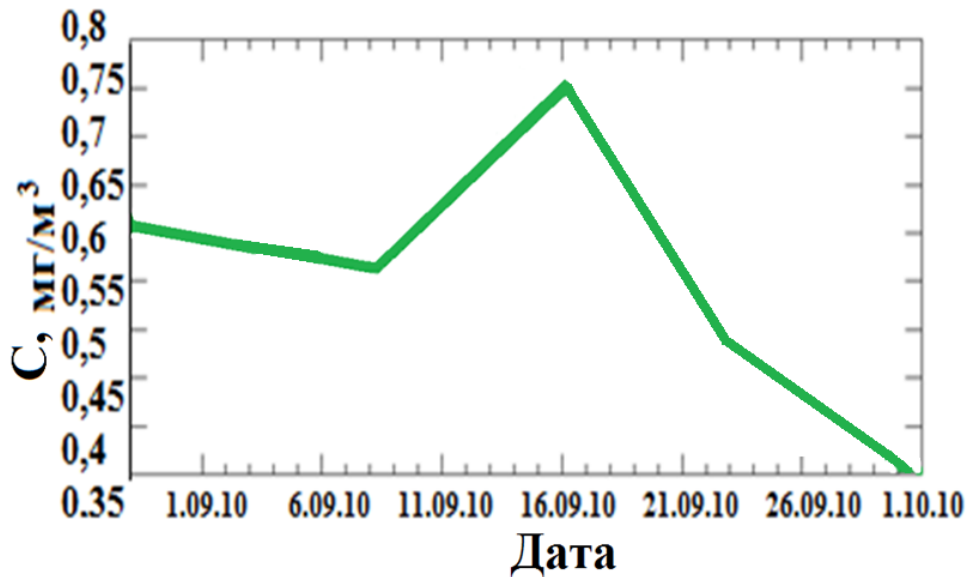


Рисунок 3.2 – Изменчивость концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря в период с 29 августа по 1 октября 2010 г. по данным спутников NASA [Varenik, Kalinskaya, 2021]

Как видно из Рисунка 3.2 концентрация хлорофилла-а после выпадения осадков 14.09.2010г. возросла в 1,3 раза. При этом в исследуемом районе не наблюдается снижения температуры поверхностного слоя вод моря (Рисунок 3.3 а, б), т.е. вовлечение нижних, более холодных и богатых биогенными элементами слоёв моря не могло повлиять на концентрацию хлорофилла-а в этот период.

Анализ отклика (увеличение концентрации фитопланктона) верхнего слоя вод Черного моря на дополнительное поступление питательных веществ с атмосферным аэрозолем для случаев пылевого переноса в сентябре 2010 года показала увеличение концентрации хлорофилла-а через 7 дней (16.09.2010 г.) после начала переноса (09.09.2010 г.) и через 2 дня после регистрирования высокой концентрации кремниевой кислоты в осадках (14.09.2010 г.).

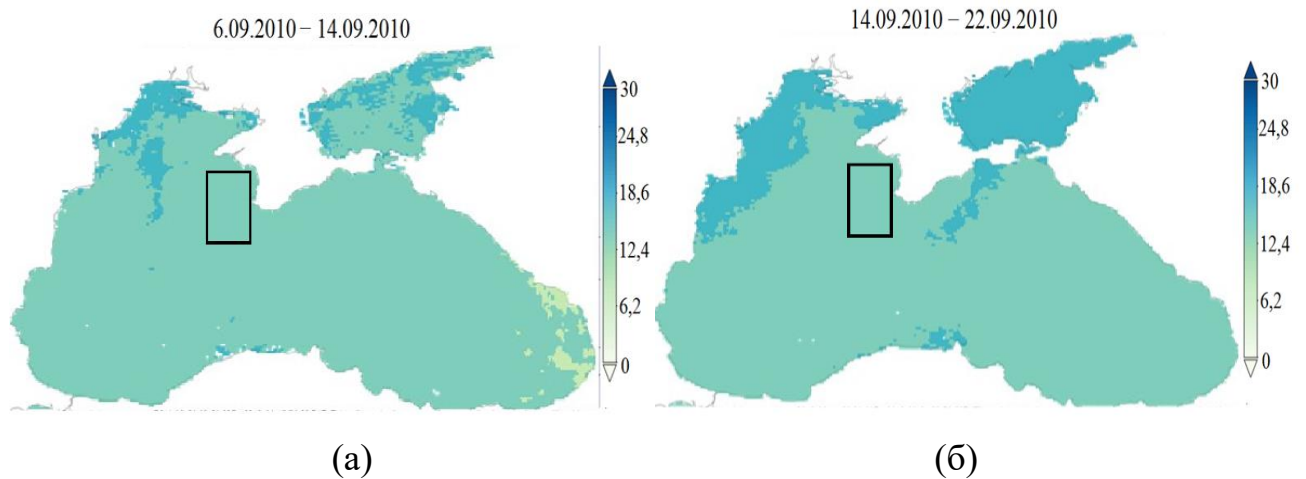


Рисунок 3.3 – Изменение температуры поверхностного слоя вод Черного моря в период до выпадения осадков (а) и после их выпадения (б)

[Varenik, Kalinskaya, 2021]

Проанализируем ситуацию 2010 года, привлекая для анализа объединённые спутниковые продукты *Aqua* и *Terra* прибора MODIS второго уровня обработки (level 2) [Архив MODIS]. Использование двух спутников повышает количество анализируемых данных, т. к. измерения спутников одного и того же участка местности происходит в разное местное время, в течение которого происходит смещение облачности.

На Рисунке 3.4 представлены результаты анализа спутниковых продуктов второго уровня AOT(869), Ангстрем и продукт NASA концентрация хлорофилла-а (std NASA). Кроме того, показано отношения коэффициента яркости моря в двух спектральных каналах 488 нм и 547 нм $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$, скорректированное на поглощающий аэрозоль согласно процедуре, описанной в работе [Shybanov and Parkova, 2022]. Все эти параметры являются функцией номера текущего дня в году. С учётом коррекции [Shybanov and Parkova, 2022] максимальные величины коэффициента $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$ были получены 09.09.2010 г. и 10.2010 г. (252 и 253 день соответственно), 13.09.2010 г. (256 день). Высокие величины этого коэффициента обусловлены влиянием пылевого аэрозоля в выделенного района в данный период времени на оптические характеристики верхнего слоя моря.

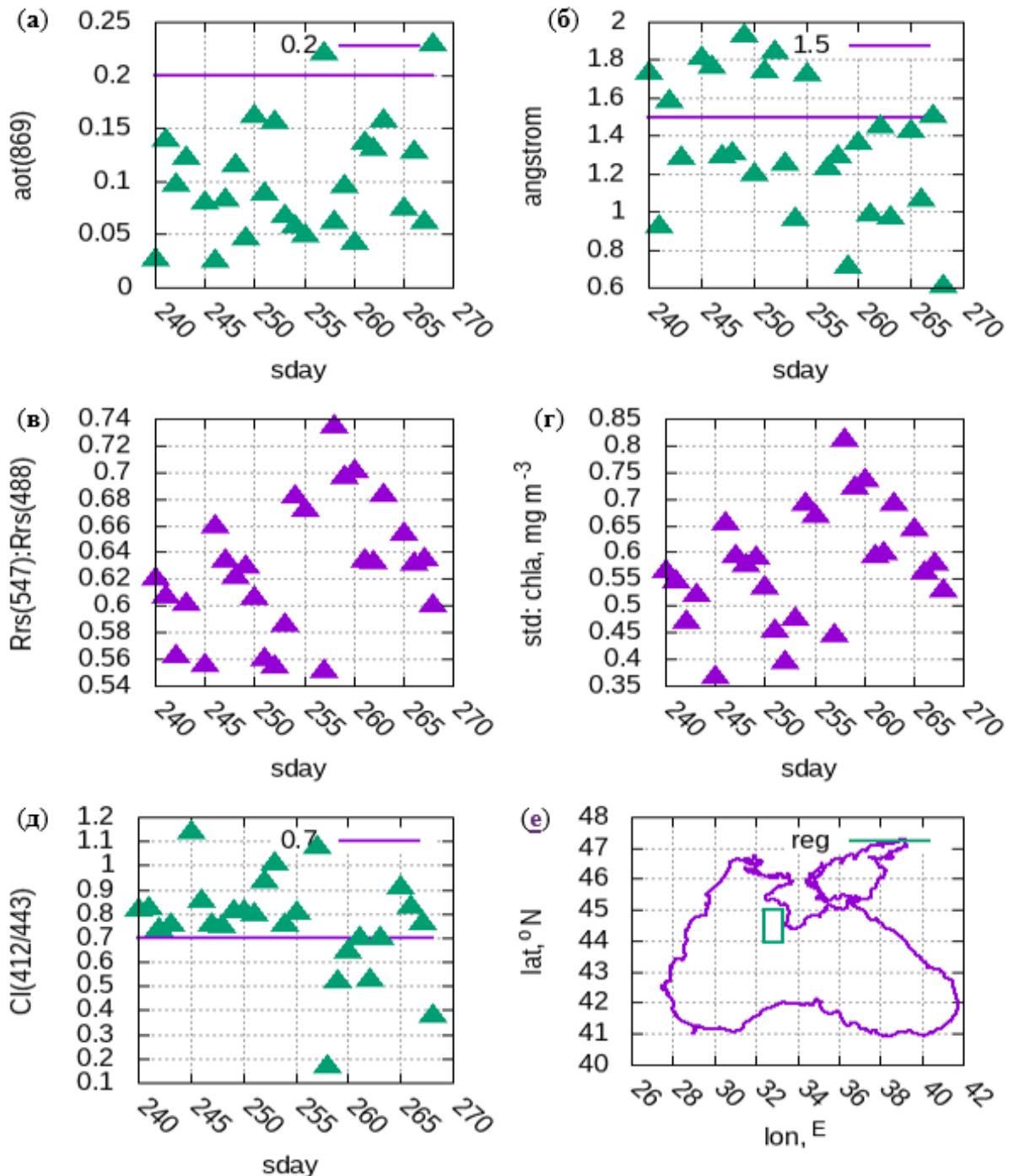


Рисунок 3.4 – Средние значения стандартных продуктов Level 2 MODIS-Aqua/Terra AOT (а), показатель Ангстрема (б), скорректированная величина отношения $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$ (в) концентрация хлорофилла-а (г), величина соотношения коэффициента $Cl(412/443)$ [Shybanov and Papkova, 2022] (д), за промежуток времени 28.08.2010 (240 день) по 27.09.2010 (270 день) для выделенного района (е), где sday — текущий день в году [Varenik, Kalinskaya, 2021]

3.1.2 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Чёрного моря за 2016 год. Концентрация фосфатов в атмосферных осадках, отобранных 13.05.2016 г., превышала среднегодовое значение более чем в 20 раз. По спутниковому изображению в этот период виден перенос воздушной массы, содержащей значительное количество пылевого аэрозоля. При рассмотрении карт распределения хлорофилла-а поверхностного слоя вод Черного моря за период 08– 24.05.2016 г. также, как и в предыдущем случае было определено повышение концентрации хлорофилла (Рисунок 3.5), не сопровождающееся снижением температуры воды (Рисунок 3.6), а значит не обусловленное апвеллингом.

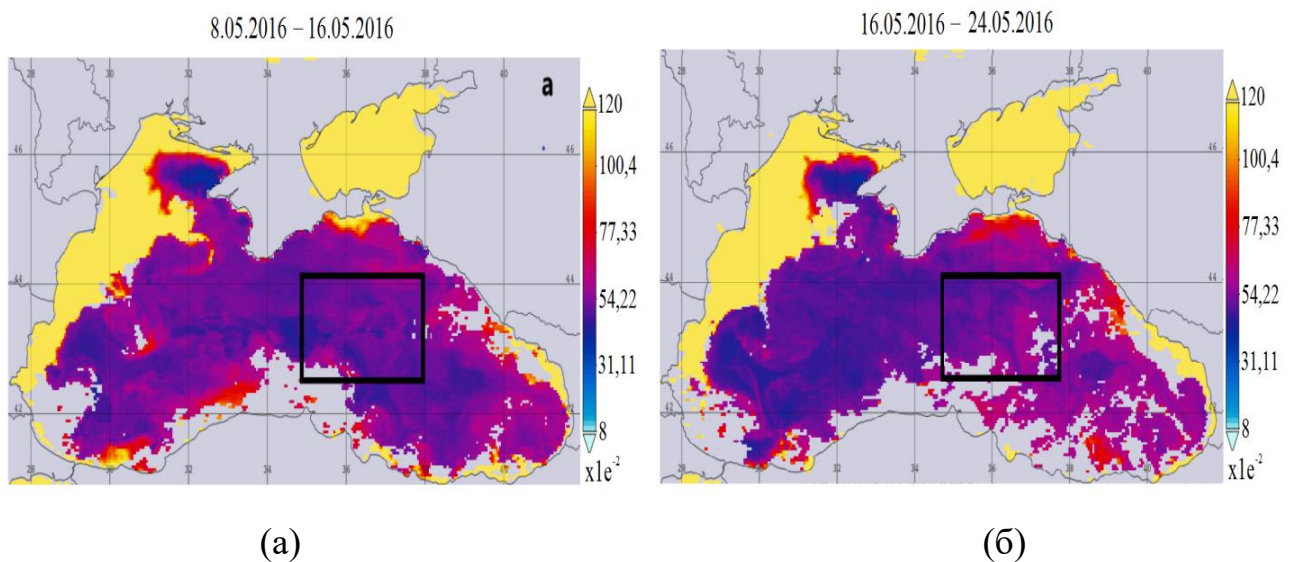


Рисунок 3.5 – Изменчивость std NASA концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря до выпадения атмосферных осадков (а) и после (б) [Varenik, Kalinskaya, 2021]

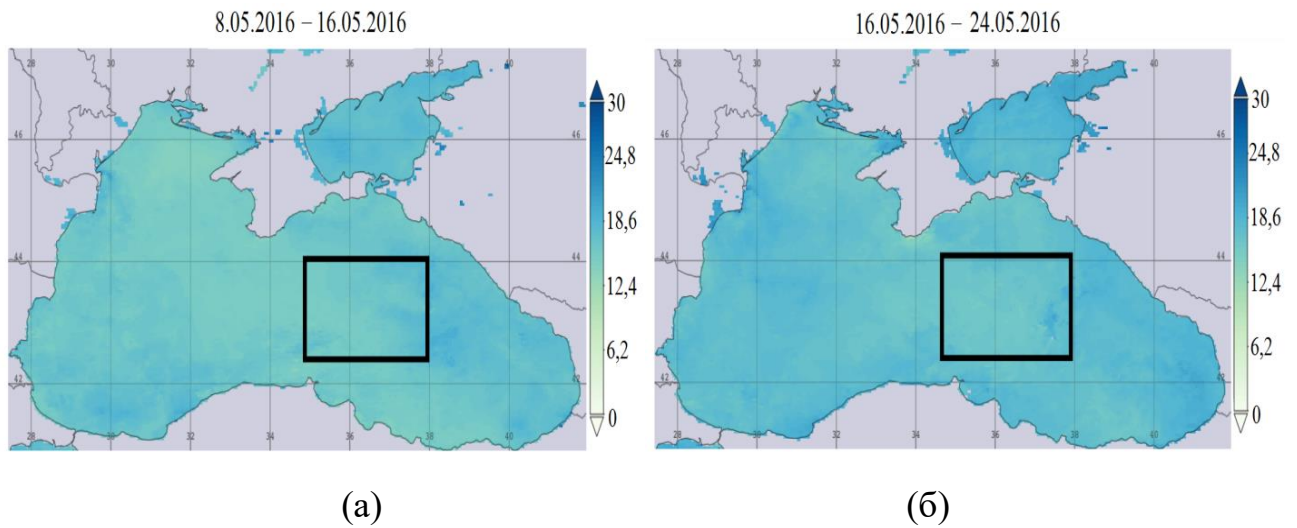


Рисунок 3.6 – Изменчивость температуры поверхностного слоя вод Чёрного моря в период до выпадения осадков (а) и после их выпадения (б)

[Varenik, Kalinskaya, 2021]

На Рисунке 3.7 показано изменение std NASA концентрации хлорофилла-а до выпадения осадков и через несколько дней после.

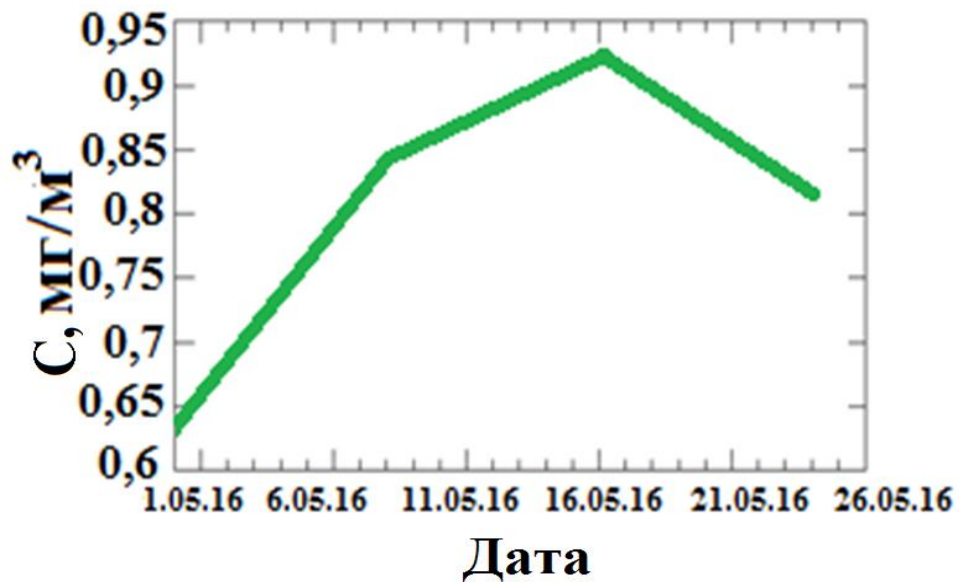


Рисунок 3.7 – Изменчивость std NASA концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Чёрного моря до и после выпадения осадков

13.05.2016 г. [Varenik, Kalinskaya, 2021]

Результаты показывают, что поступление атмосферных осадков с чрезвычайно высокими концентрациями кремния и фосфора (даже эпизодические события) может повлиять на морскую экосистему, включая биологическое сообщество и концентрацию хлорофилла-а. Поступление биогенных элементов с атмосферными осадками может привести к дополнительному потреблению кислорода для окисления органического вещества в количестве, практически соответствующем его суточной выработке в процессе фотосинтеза, поддерживающего дефицит кислорода и субкислородные условия. Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что атмосферные выпадения фосфора и кремния имеют большое значение для морской системы Чёрного моря.

Проанализируем ситуацию 2016 года, привлекая для анализа объединённые спутниковые продукты второго уровня прибора *MODIS* с двух спутников (Aqua и Terra) [Архив MODIS]. На Рисунке 3.8 представлены результаты анализа спутниковых продуктов второго уровня AOT(869), Ангстрем и std NASA концентрация хлорофилла-а аналогично переносу за 2010 год. Максимальная величина отношения $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$, [Shybanov, Papkova, 2022], связанная с влиянием пылевого аэрозоля на оптические характеристики выделенной области моря была получена 04.06.2016 г. (125 день). Стоит отметить, что с 4 по 8 мая наблюдались высокие значения коэффициента $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$, что говорит об интенсивном длительном переносе пылевого аэрозоля.

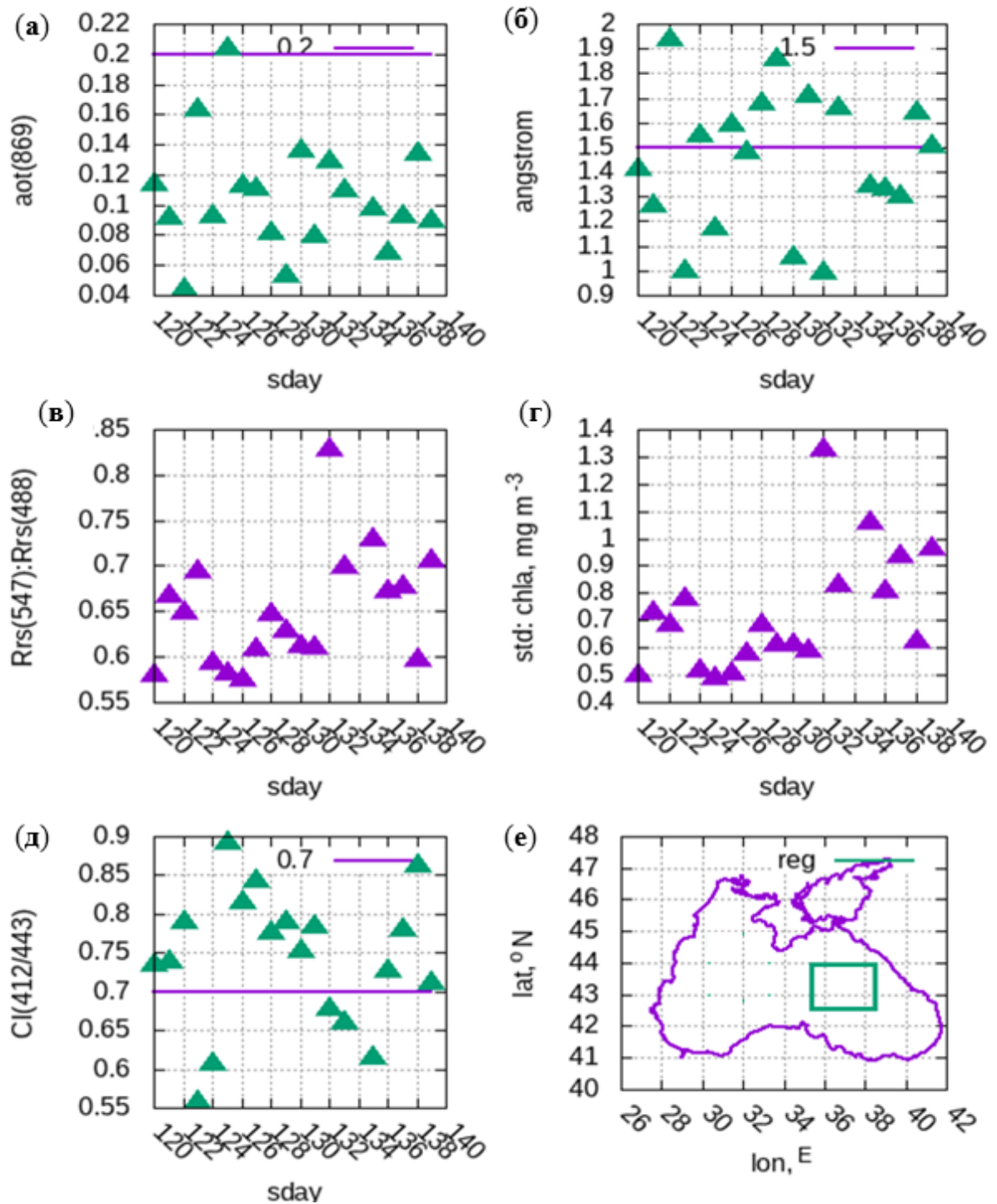


Рисунок 3.8 – Средние значения стандартных продуктов Level 2 MODIS-Aqua/Terra AOT (а), показатель Ангстрема (б), скорректированная величина отношения $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$ (в) концентрация хлорофилла-а (г), величина соотношения коэффициента $CI(412/443)$ [Shybanov and Parkova, 2022] (д), расположение исследуемой анализируемой области Черного моря (е) за промежуток времени 29 апреля (120) по 19 мая (140) 2016 года, где sday — текущий день в году

3.1.3 Оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Чёрного моря за 2018 год. Рассмотрим еще несколько случаев, когда концентрация исследуемых веществ превышала средневзвешенную величину более чем в 10 раз, и именно для этих дат проанализированы значения АОТ и спутниковые изображения.

Анализ проб осадков 22.03.2018 г. и 2.04.2018 г. показал, что концентрация фосфатов и силикатов в осадках, отобранных в эти дни, составила 4,73 мкмоль/л и 14,69 мкмоль/л соответственно для 22.03.2018, и 2,28 мкмоль/л и 8,22 мкмоль/л – для 2.04.2018. Это превышает среднюю для 2018 года концентрацию исследуемых биогенных веществ в 5 и 7 раз, а также в 2,5 и 4 раза соответственно. Загрузка аридным аэрозолем в исследуемый период была аномально высокой. С 21.03.2018 г. по 04.04.2018 г. над станцией Sevastopol наблюдалась облачность, не позволяющая произвести измерения АОТ, однако на ближайшей к Крыму Черноморской станции сети AERONET Gloria [Архив AERONET]. были произведены измерения ослабления прямого солнечного излучения. Анализ данных аэрозольной оптической толщины на длине 500 нм на станции Gloria показал преимущество крупных аэрозольных частиц и их основной вклад в общее распределение АОТ(500) за 22.03.2018 г. Данные моделирования переноса атмосферного аэрозоля на различных высотах показали перенос аридного типа аэрозоля на высоте от 3 до 5 км со стороны пустыни Сахара как по результатам сети AERONET, так и по модели HYSPLIT [Архив HYSPLIT].

По данным за 22.03.2018 г. о наличии пылевого аэрозоля над акваториями практически все восточное побережье Средиземного моря имеет максимальную загрузку аридным аэрозолем (Рисунок 3.9, а). Спутниковые данные MODIS за 02.04.2018 г. также подтвердили вынос пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара, однако его интенсивность меньше, чем вынос, регистрируемый 22.03.2018 г. (Рисунок 3.9, б), что подтверждается и меньшими величинами концентраций исследуемых биогенных веществ.

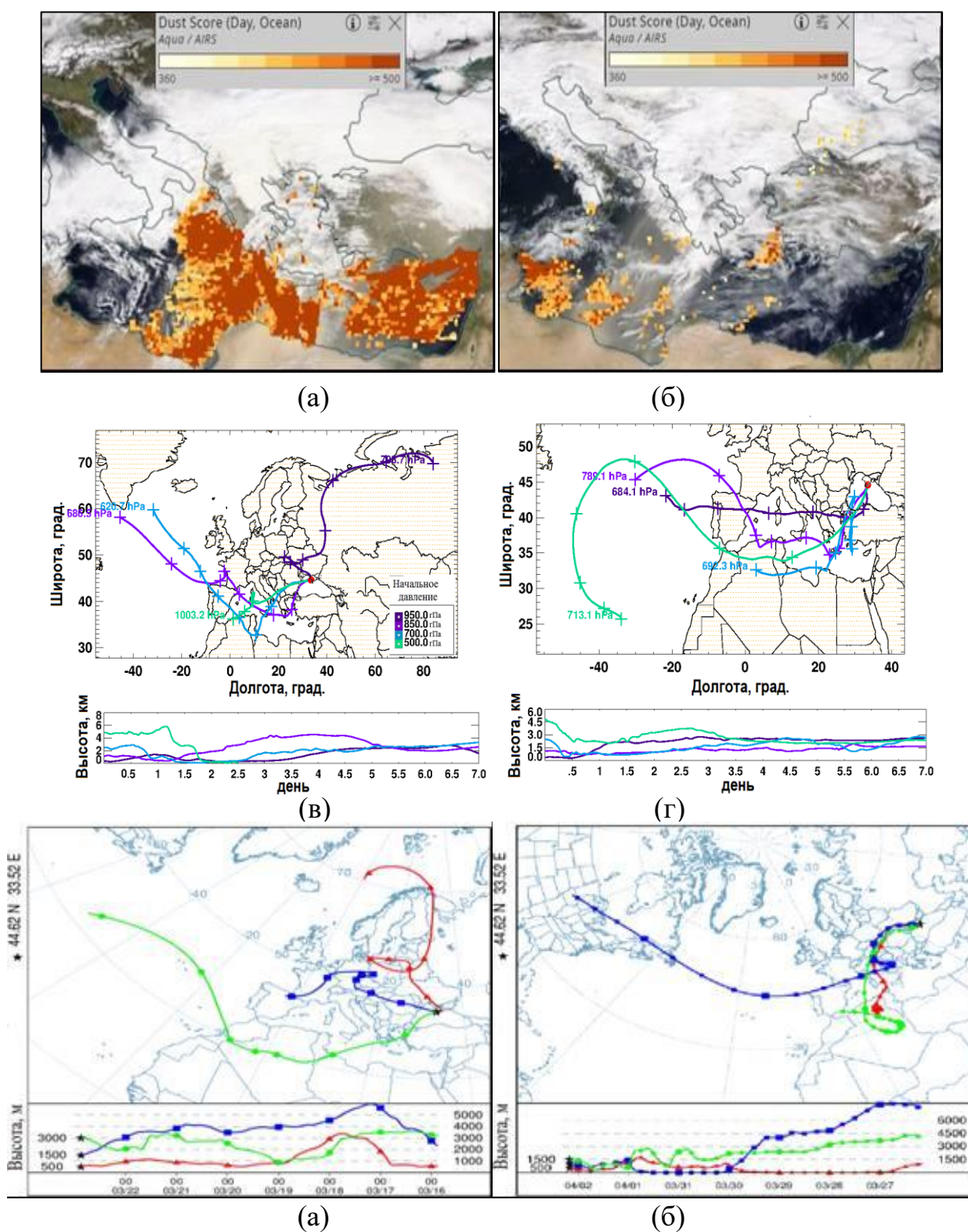


Рисунок 3.9 – Аэрозольная нагрузка пылевым аэрозолем за 22.03.2018 г. (а) и за 02.04.2018 г. (б); результаты данных обратных траекторий по результатам моделирования AERONET за 22.03.2018 г. (в) и за 2.04.2018 г. (г); результаты данных обратных траекторий по результатам моделирования HYSPLIT за 22.03.2018 г. (д) за 2.04.2018 г. (е) [Kalinskaya, Varenik, 2019]

Как видно из Рисунка 3.9, 22.03.2018 г. и 2.04.2018 г. регистрируется перенос пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара для двух Черноморских станций (Gloria и Sevastopol) как по данным моделирования обратных траекторий сети AERONET, так и по данным моделирования переносов HYSPLIT. Стоит отметить, что по данным обратных траекторий AERONET перенос пылевого аэрозоля был через центральную часть Чёрного моря со стороны юга на всех четырёх высотах.

Анализ спутниковых изображений для оценки изменчивости std NASA концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря для данного периода исследований показал увеличение интенсивности цветения фитопланктона (аномалия) по ходу перемещения пылевого переноса. Данная аномалия стала развиваться через 2 дня после регистрации окончания пылевого переноса (04.04.2018 г.) с максимумом цветения в центральной южной части Чёрного моря 07.04.2018 г., после чего концентрация хлорофилла-а начала уменьшаться. Увеличение std NASA концентрации хлорофилла-а могло быть обусловлено апвеллингом, однако аномалии температуры за этот период для данных участков зарегистрированы не были (Рисунок 3.10). За период с 2013 по 2018 гг. в области, где наблюдалось интенсивное цветение, среднее значение концентрации хлорофилла-а за апрель составило $0,92 \text{ мг/м}^3$. За 7 апреля значения концентрации хлорофилла-а в области интенсивного цветения находились в диапазоне $10 - 40 \text{ мг/м}^3$, что выше среднемесячного значения за апрель 2018 г. ($1,2 \text{ мг/м}^3$) более, чем в 10 раз (Рисунок 3.10).

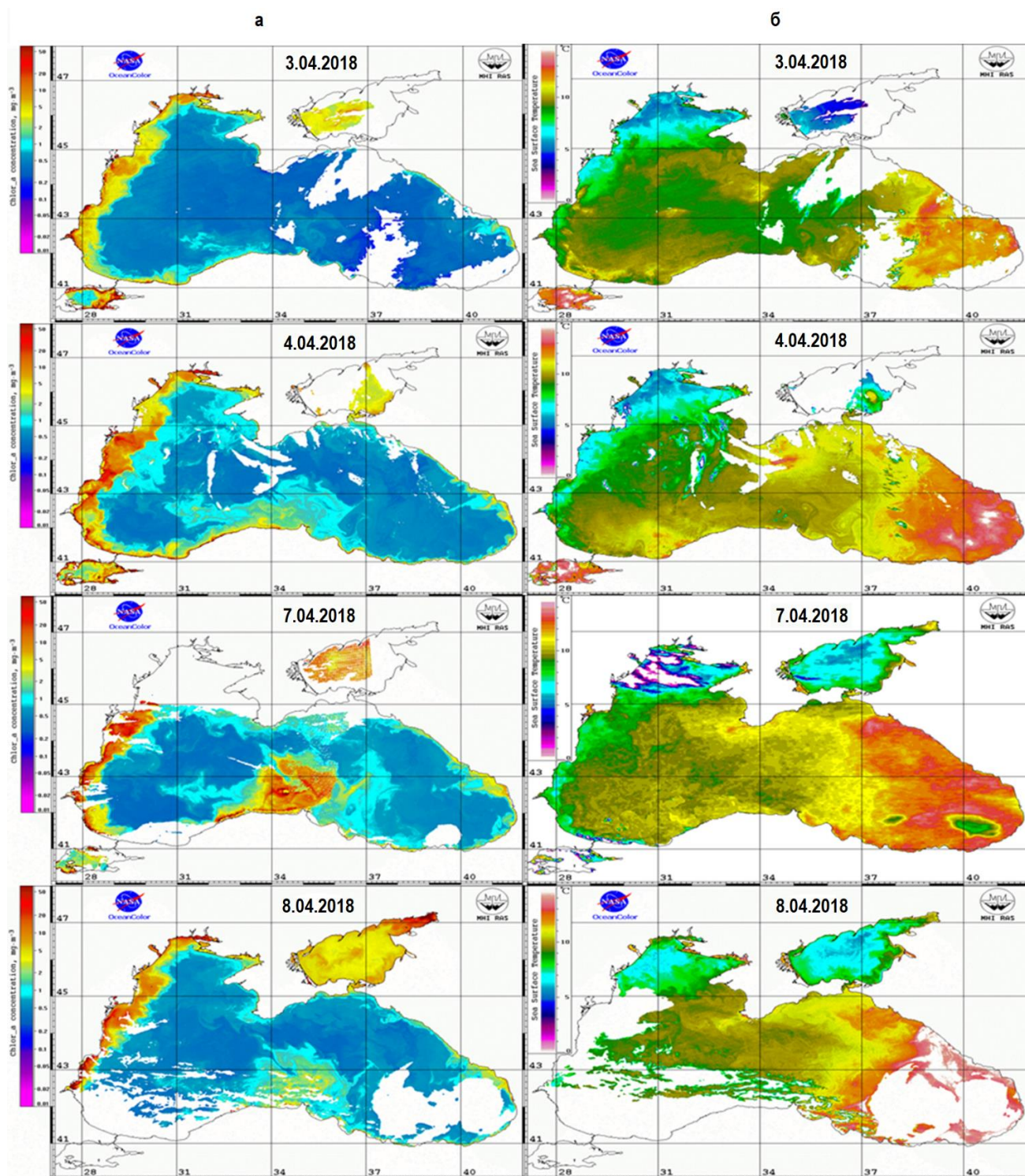


Рисунок 3.10 – Изменчивость std NASA концентрации хлорофилла-а за 03.04.2018, 04.04.2018, 07.04.2018 и 08.04.2018 (а); изменчивость температуры поверхностного слоя Черного моря за за 03.04.2018, 04.04.2018, 07.04.2018 и 08.04.2018 (б) [Kalinskaya, Varenik, 2019]

Также некорректные оценки std NASA концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным могли быть получены из-за наличия аэрозоля, который длительное время после прохождения пылевого переноса может оставаться в определённых слоях и не оседать. Для исключения данного фактора проведен анализ АОТ над областью повышенной std NASA концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным. Повышенные значения АОТ подтверждены за 02.04.2018 г., а за период с 03.04.2018 по 08.04.2018 г. величины АОТ не превышали фоновых значений ($\text{АОТ}(500) = 0,12$, $\alpha = 1,2$ за 7.04.2018), что подтверждает рост значений концентрации хлорофилла-а в результате переноса пылевого аэрозоля (за счет дополнительного поступления биогенных веществ, являющихся источником питания фитопланктона, из атмосферы в верхний слой вод моря).

В результате исследований случаев пылевого аэрозоля, содержащего высокие концентрации биогенных веществ, можно сделать вывод, что влияние пыли на биооптические характеристики, обусловленное развитием фитопланктона, должно проявляться не сразу. Это объясняется тем, что процессу роста биопродуктивности предшествует несколько условий, нарушение, или отсутствие одного из которых не приводит к увеличению концентрации фитопланктона.

Этими условиями являются: 1) биогенные вещества,, которые могут являться источником дополнительного питания для фитопланктона, переносимые в следствие пылевого переноса в акваторию в большом количестве должны попасть в водоём, а значит пылевой перенос должен быть интенсивным и длительным по времени; 2) фитопланктон должен находиться на глубине, позволяющей усвоить биогенные вещества, переносимые в результате пылевой бури, которые попали в воду вследствие сухих или мокрых осадков; 3) осаждение веществ в результате пылевого переноса регистрируется в период не интенсивного цветения кокколитофорид для Чёрного моря. Это объясняется тем, что при интенсивном цветении наблюдается резкое увеличение коэффициента яркости моря, а значит определить возникло ли увеличение биопродуктивности именно из-за усвоения фитопланктоном биогенных веществ, содержащихся в пыли, в настоящее время маловероятно.

По аналогии с предыдущими случаями анализа пылевых переносов проанализируем ситуацию 2018 года, привлекая для анализа объединённые спутниковые продукты второго уровня прибора MODIS с двух спутников Aqua и Terra.

На Рисунке 3.11 представлены результаты анализа спутниковых продуктов второго уровня AOT(869), Ангстрем и std продукт NASA концентрация хлорофилла-а, а также коэффициент Cl(412/443) описанный в работе [Shybanov, Parkova, 2022]. Как и для предыдущих случаев величина коэффициента Cl(412/443) выше 0,7 обусловлена влиянием пылевого аэрозоля в исследуемом районе. Максимальные значения Cl(412/443) получены 02.04.2018 и 04.04.2018 г. по данным MODIS Aqua и 03.04.2018 г. по данным MODIS Terra, что совпадает с данными, когда были получены повышенные значения AOT(500) и низкие значения параметра Ангстрема.

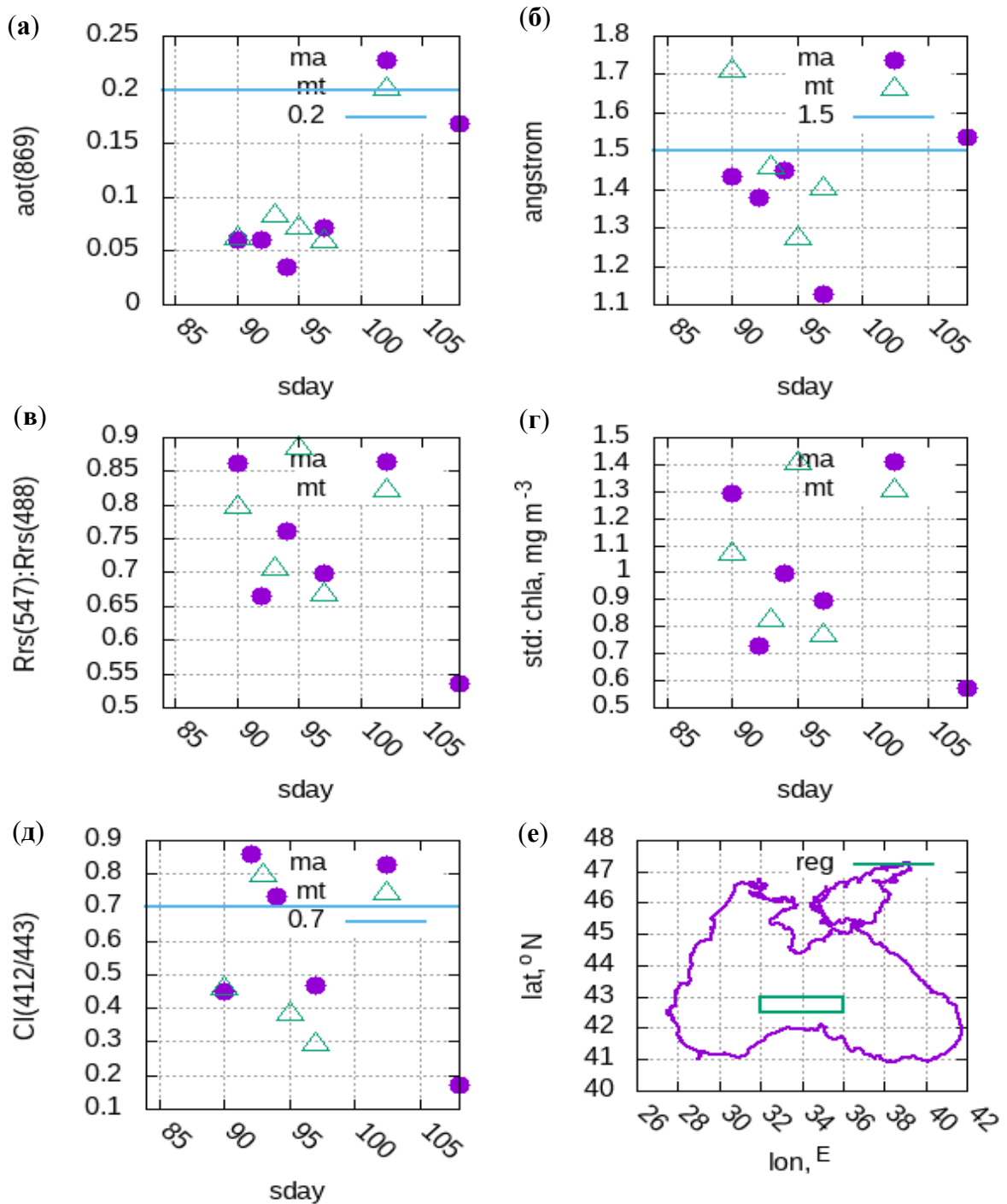


Рисунок 3.11 – Средние значения стандартных продуктов Level 2 MODIS-Aqua/Terra AOT (а), показатель Ангстрема (б), скорректированная величина отношения $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$ (в) концентрация хлорофилла-а (г), величина соотношения коэффициента $CI(412/443)$ [Shybanov and Parkova, 2022] (д), за промежуток времени 24 марта (83) по 20 апреля (110) 2018 года для выделенного района (е), где sday – текущий день в году, ma и mt – данные MODIS-Aqua и MODIS-Terra соответственно

3.2 Влияние пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Чёрного моря с использованием спутниковых данных и измерений *in situ*

Одним из основных показателей качества атмосферного воздуха является содержание в нем взвешенных частиц. Взвешенные частицы (PM — particulate matter) относятся к загрязнителям атмосферы, которые чаще всего анализируют по массовым концентрациям частиц. Особое внимание необходимо уделять концентрации переносимых в воздухе веществ с размерами частиц меньше 2,5 мкм (PM_{2,5}) и больше 10 мкм (PM₁₀) [Ревич, 2018; Кузнецова и др., 2014].

Взвешенные атмосферные частицы – это смесь, физические и химические характеристики которой меняются в зависимости от источника их происхождения и различных метеорологических факторов, влияющих на перемещение и взаимодействие частиц друг с другом. В PM_{2,5}, которые часто называют мелкодисперсными взвешенными частицами, также входят ультрамелкодисперсные частицы диаметром менее 0,1 мкм. На большей части территории Европы PM_{2,5} составляет 50–70% PM₁₀ [Ревич, 2018; Кузнецова и др., 2014].

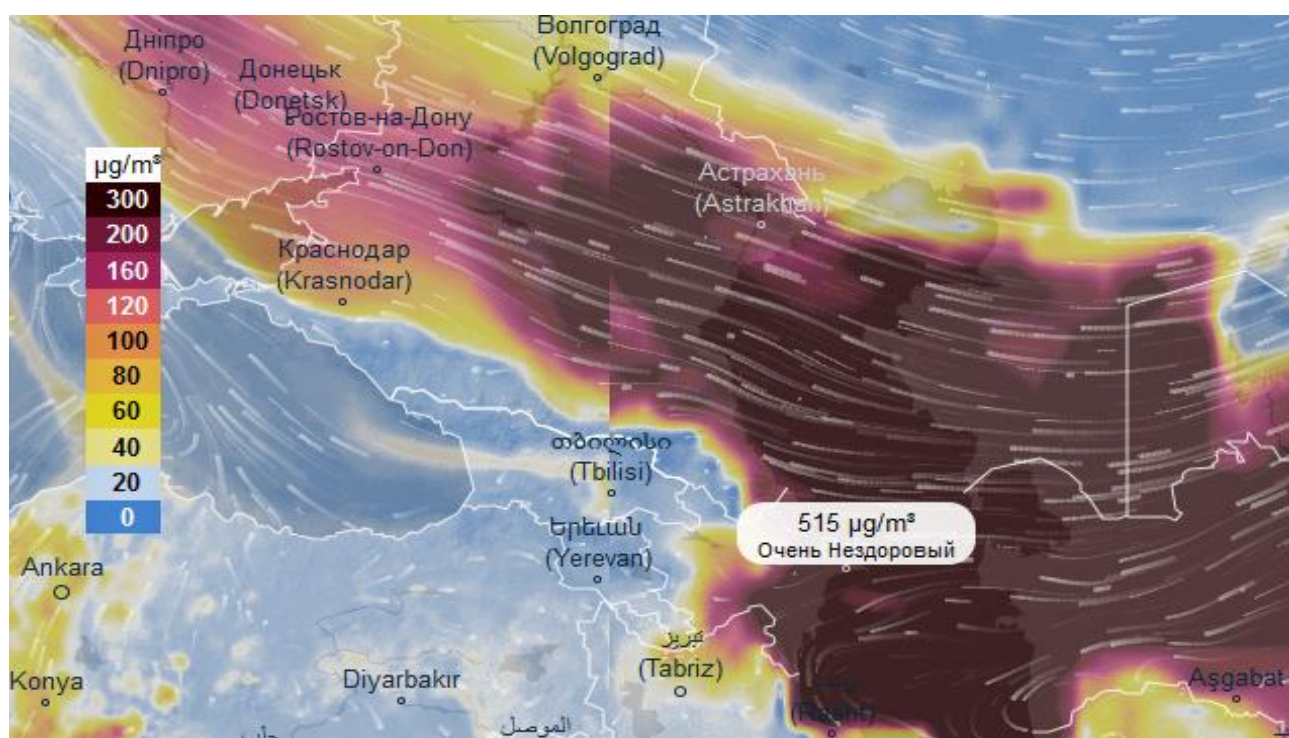
Взаимосвязь между событиями переноса взвешенных частиц PM₁₀ и изменчивостью свойств морской воды также можно определить по оценке концентрации и флуоресценции фитопланктона или различных пигментов в поверхностном слое моря до и после прохождения пылевого переноса. Для исследования интенсивности флуоресценции (ИФ) растворённого органического вещества (РОВ) используется UV LED (рабочая длина волны 365 нм), расположенный перпендикулярно к RGBA LED. Регистрация флуоресценции и рассеяния происходит на спектральных каналах 360, 460, 530, 570, 625 и 685 нм.

Для определения источника взвешенных частиц были проанализированы обратные траектории перемещения воздушных потоков по модели HYSPLIT [Архив HYSPLIT]. Данные HYSPLIT также используются в различных моделях, описывающих атмосферный перенос, диспергирование и осаждение загрязняющих веществ и опасных материалов.

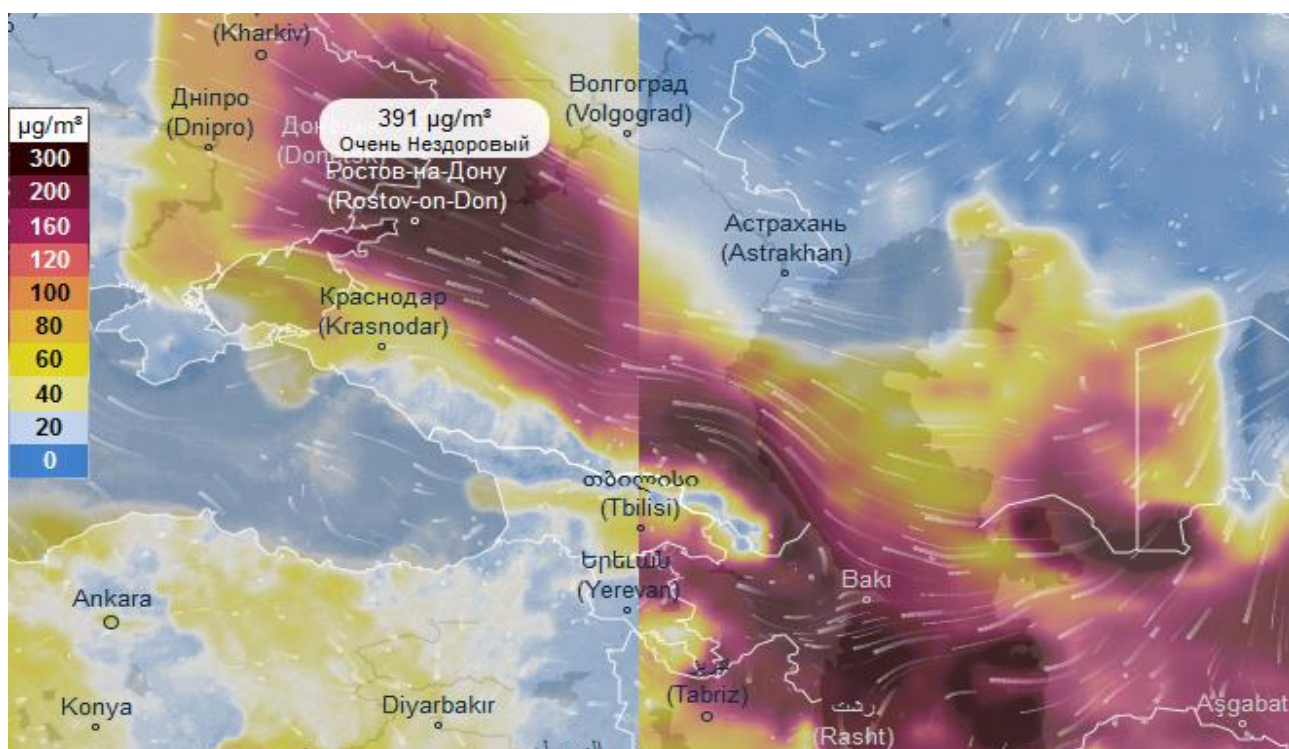
По данным Ventusky [Архив Ventusky]., за период с 25.09.2020 г по 1.10.2020 г. была зафиксирована аномально высокая концентрация частиц PM_{10} . За двое суток (29 – 30 сентября) значение концентрации частиц PM_{10} на территории Узбекистана, Казахстана и Туркмении превысило 500 мкг/м^3 , а в юго-восточной части России – 330 мкг/м^3 (Рисунок 3.12 а, б). Жители Ростовской области вследствие аномального переноса воздушных масс в этот регион 29.09.2020 г. и 30.09.2020 г. отмечали резкое ухудшение видимости и изменение цвета горизонта.

По спутниковым данным MODIS (Рисунок 3.13, а) [Архив MODIS] и данным приложения Ventusky (Рисунок 3.13, б) за 29.09.2018, облако взвешенных частиц PM_{10} находилось на территории, через которую проходят траектории переноса воздушных масс в приземном слое атмосферы (до 1 км) по данным модели HYSPLIT (Рисунок 3.13, в).

Были проанализированы спутниковые данные MODIS и CALIPSO [Архив CALIPSO] за период с 25.09.2020 г. по 01.10.2020 г. для определения масштабов переноса и типизации взвешенных частиц PM_{10} . По данным типизации аэрозольных частиц CALIPSO, в районе Ростовской и Донецкой областей находился пылевой загрязненный аэрозоль.



(a)



(б)

Рисунок 3.12 – Перенос пылевого аэрозоля над черноморским регионом по данным приложения Ventusky: а – за 29.09.2020 г.; б – за 30.09.2020 г.

[Калинская, Кудинов, 2021]

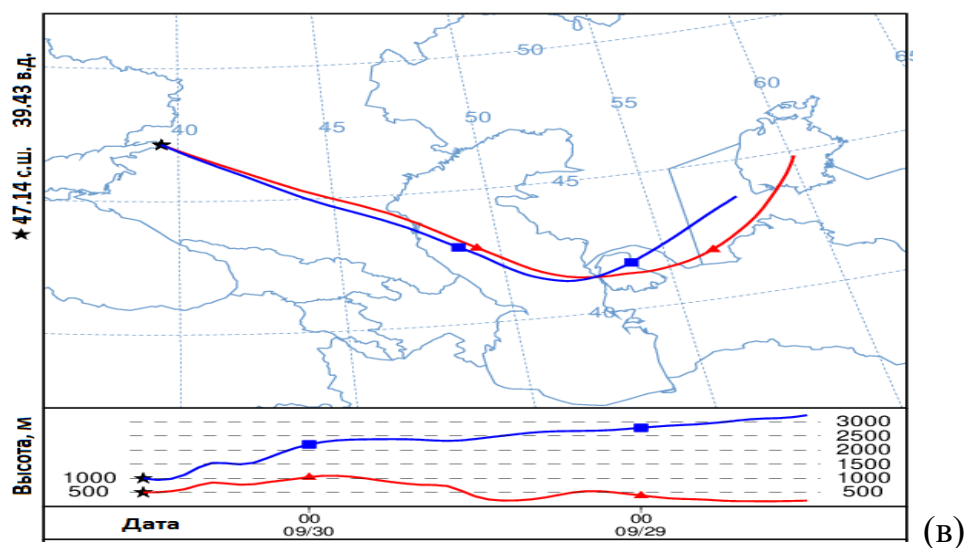
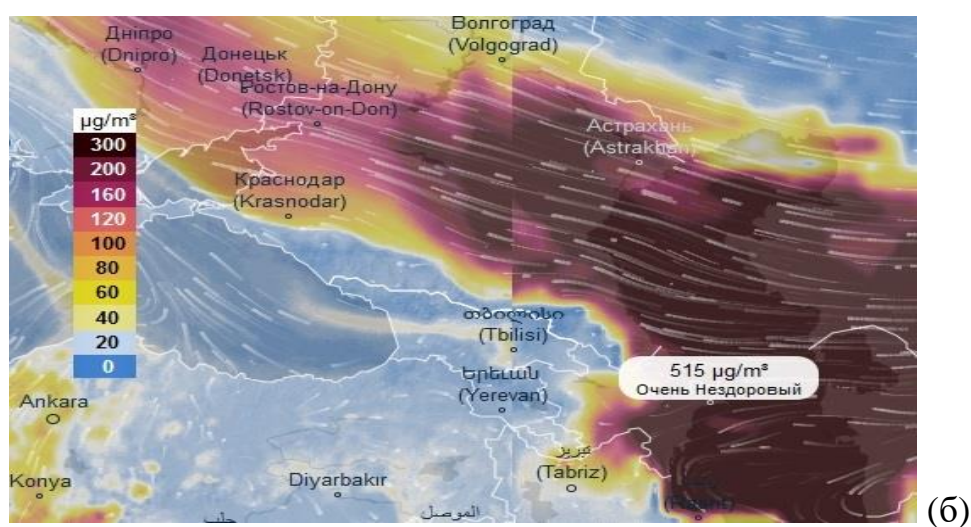
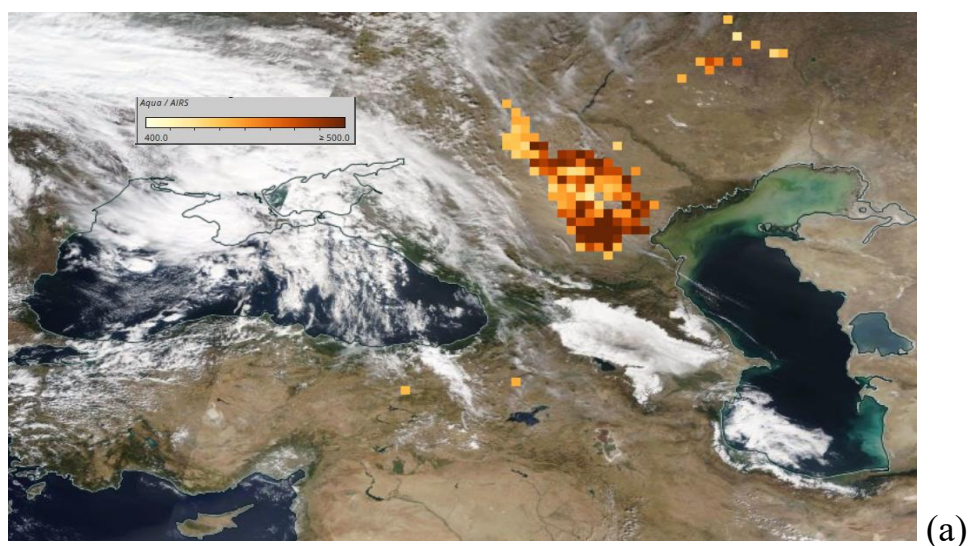


Рисунок 3.13 – Перенос пылевого аэрозоля по спутниковым данным: MODIS (а); Ventusky (б); обратные траектории переноса воздушных масс по результатам моделирования HYSPLIT за 29.09.2020 г. (в)

[Калинская, Кудинов, 2021]

Согласно метеорологическим данным [Архив RP5] за 30.09.2020 г., в Ростовской и Донецкой областях наблюдалась дымка, затем умеренная пылевая буря с последующими осадками над исследуемыми областями. В различных информационных источниках было много фотоматериалов о содержании аномальной взвеси кирпичного цвета в каплях выпавшего дождя. Известно, что на поверхности взвешенных частиц РМ конденсируется влага, что приводит к их осаждению на подстилающую поверхность. Это означает, что частицы РМ могут влиять на оптические характеристики подстилающей поверхности в области их потенциального осаждения. Анализ данных приложения Ventusky за 30.09.2020 г. (Рисунок 3.12, б) показал наличие облака частиц РМ₁₀ в северо-западной части Чёрного моря, что затрагивает и акваторию Керченского пролива, в котором проводились измерения оптических характеристик морских вод и атмосферы с борта НИС «Профессор Водяницкий».

По данным измерений фотометром SPM, полученным с борта НИС «Профессор Водяницкий», среднее значение аэрозольной оптической толщины за 29.09.2020 г. $AOT(500) = 0,27$, за 30.09.2020 г. $AOT(500) = 0,26$, что более чем в 1,5 раза превышает среднемесячное значение $AOT(500) = 0,156$. Анализ вклада аэрозольных фракций различного размера в общую величину АОТ за исследуемые дни показал, что в основном (более 70%) в эти дни атмосферный аэрозоль состоит из частиц мелкодисперсной фракции. Среднедневные значения влагосодержания за 29 и 30 сентября превышали среднемесячные значения более чем в полтора раза, и это подтверждает, что указанные частицы конденсировали влагу. По мере развития и движения облака они выпали с осадками на подстилающую поверхность региона исследования.

На Рисунке 3.14 синей кривой показан средний профиль интенсивности флуоресценции растворённого органического вещества (ИФ РОВ) за 2 недели до выпадения осадков, содержащих взвешенные частицы РМ₁₀; зеленой кривой – средний профиль ИФ РОВ за 2 дня до 30 сентября, в течение которых частицы РМ₁₀ предположительно уже могли осаждаться на поверхностный слой в районе северо-

западного шельфа, так как уже наблюдался интенсивный перенос частиц в этом направлении; красная кривая средний профиль ИФ РОВ через 2 дня после 30 сентября, т.е. во время осаждения и заглубления осажденных взвешенных частиц в исследуемом регионе. Полученные данные были осреднены по одним и тем же точкам проведения рейсовых измерений в квадрате с координатами 44,07728° N, 36,98396° E; 44,07728° N, 36,44407° E; 43,78721° N, 36,44407° E; 43,78721° N, 36,98396° E за двухнедельный период.

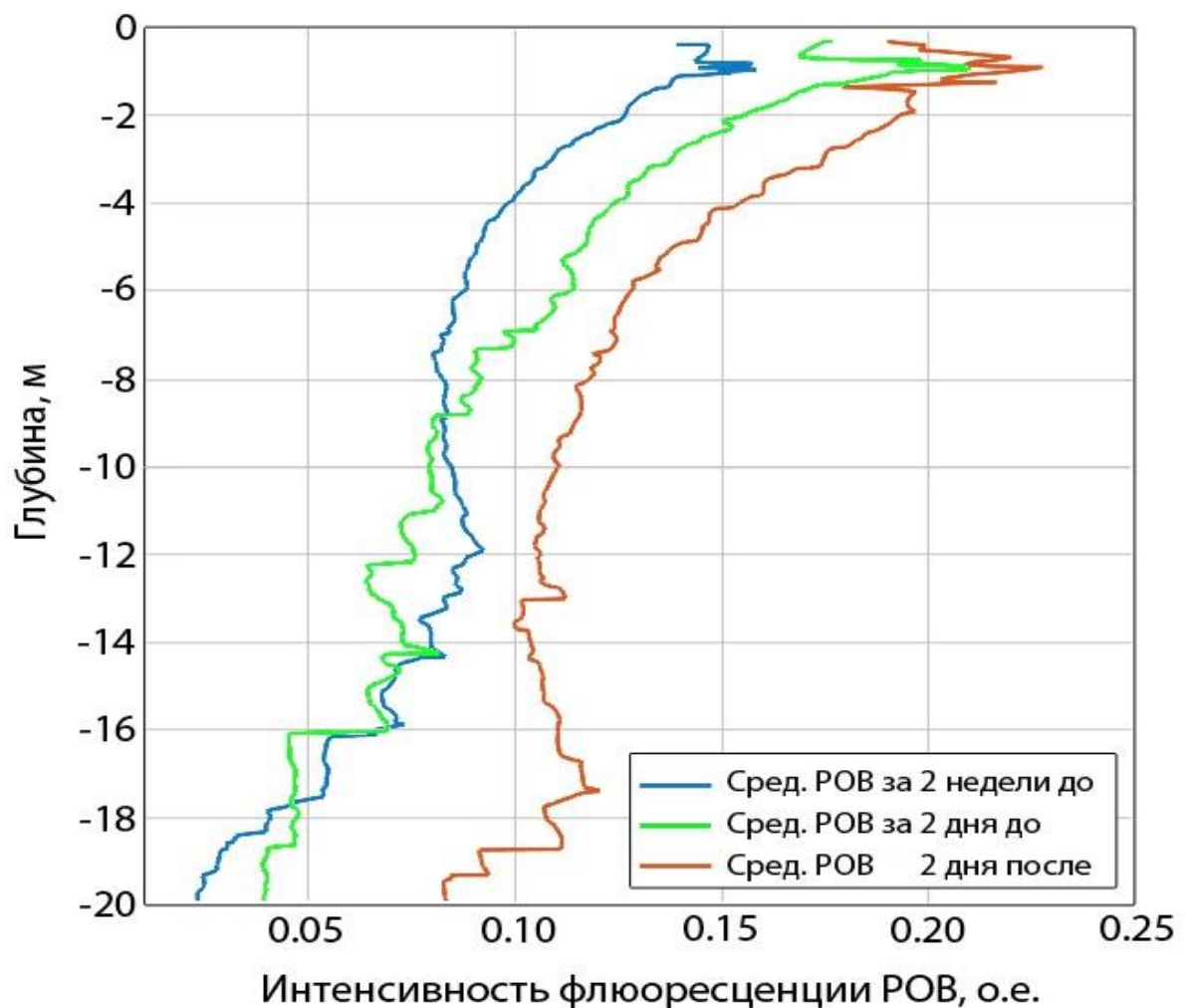


Рисунок 3.14 – Изменчивость вертикального профиля интенсивности флуоресценции (ИФ) растворённого органического вещества (РОВ)

[Калинская, Кудинов, 2021]

Как видно из Рисунке 3.14, ИФ РОВ в поверхностном слое до 5 метров за 2 недели до переноса взвешенных частиц отличается от ИФ РОВ за 2 октября в 1,5 раза. Анализ данных о направлении приземного ветра за 1 и 2 октября показал совпадение с данными о направления ветра за 30 сентября. Различие в ИФ РОВ в поверхностном слое до 2 метров за 2 дня до и 2 дня после выпадения осадков со значениями ИФ за 2 недели до переноса доказывает, что процесс осаждения частиц PM_{10} не ограничивается лишь попаданием частиц в поверхностный слой с дождём, а их осаждение также происходит в и сухом виде на протяжении всей недели переноса.

Далее на Рисунке 3.15 представлен анализ данного пылевого переноса по данным прибора MODIS с двух спутников Aqua и Terra и методики [Shybanov and Parkova, 2022]. Максимальные значения за исследуемый период коэффициента $CI(412/443)$ были получены 30.09.2020 г. и 1.10.2020 г., что также подтверждает воздействие пылевого аэрозоля на поверхностный слой Черного моря.

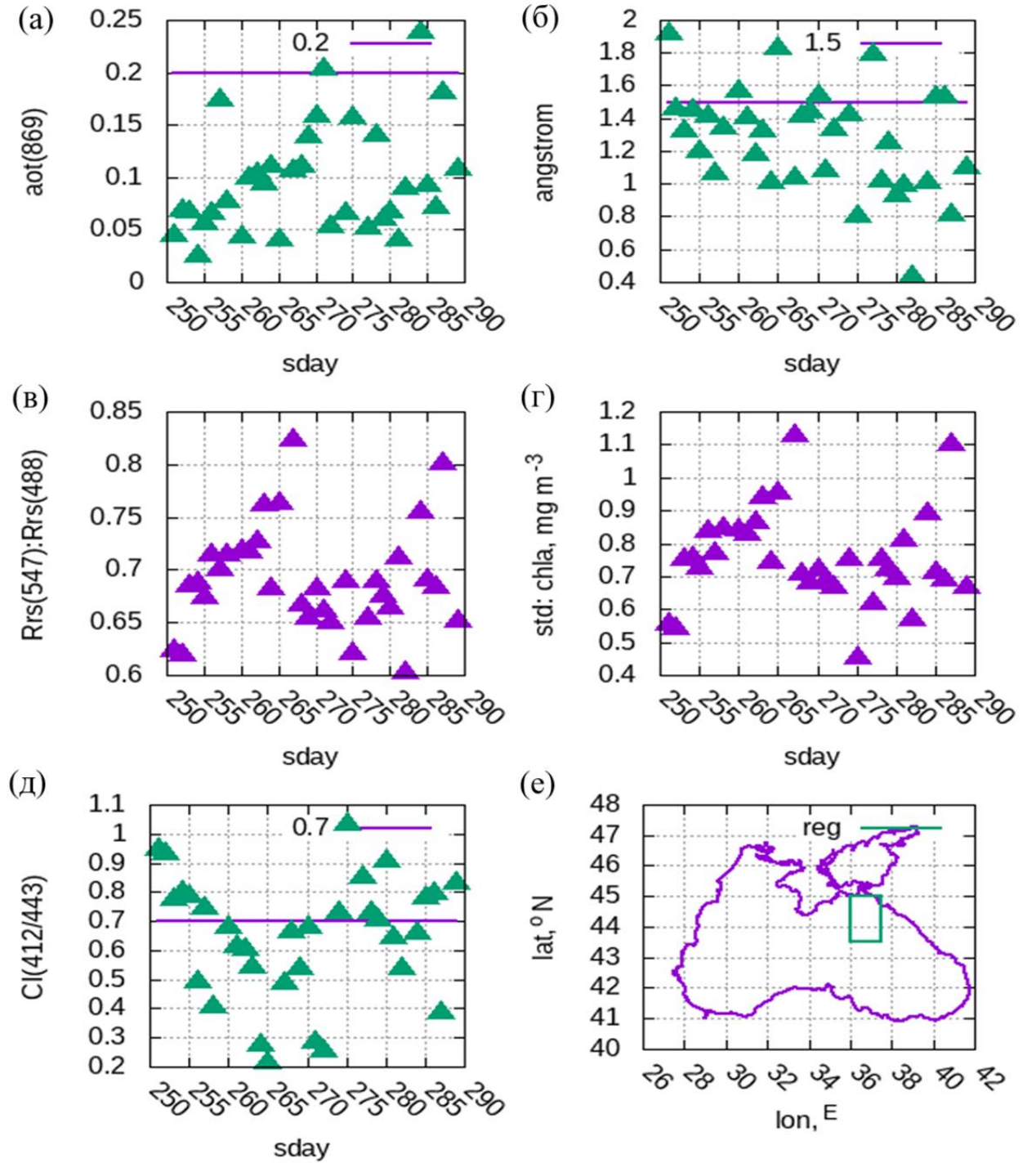


Рисунок 3.15 – Средние значения стандартных продуктов Level 2

MODIS-Aqua/Terra AOT (а), показатель Ангстрема (б), скорректированная величина отношения $R_{RS}(547)/R_{RS}(488)$ (в) концентрация хлорофилла-а (г), величина соотношения коэффициента $CI(412/443)$ [Shybanov and Parkova, 2022] (д), за промежуток времени 6 сентября (250) по 16 октября (110) 2020 года для выделенного района (е), где sday — текущий день в году

Выводы к главе 3

Приведенные в Главе 3 исследования позволили сделать следующие выводы:

1) Показано, что для региона Черного моря пылевой и дымовой аэрозоль ухудшает качество спутниковых снимков и, соответственно, не дает возможности получить реальные оценки биооптических характеристик верхнего слоя водоемов методами дистанционного зондирования.

2) Определено, что при регистрации высоких значений АОТ и повышенных концентраций неорганического фосфора и кремния в пробах атмосферных осадков по обратным траекториям моделей AERONET и HYSPLIT определяется поступление в исследуемый регион пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара. При этом коэффициенты корреляции значений АОТ и концентраций микроэлементов (PO_4^{3-} и SiO_3^{2-}) в осадках составляют $R = 0,79$ и $R=0,73$ соответственно.

3) Показано, что рост суммарного поглощения не является следствием ошибки атмосферной коррекции из-за поглощающих свойств пылевого аэрозоля, т. к. была выполнена соответствующая процедура коррекции стандартного спутникового продукта – коэффициента яркости моря, следуя методике, описанной в работе [Shybanov and Parkova, 2022]. Одна из причин роста суммарного поглощения может быть связана с высокими значениями концентраций PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в пылевом аэрозоле, что было доказано по прямым измерениям проб атмосферных осадков в даты пылевого переноса. Другой причиной (параграф 3.2) могла быть абсорбция растворённого органического вещества частицами аэрозоля, попавшими в верхний слой воды, что привело к кратковременному повышению флуоресценции органического вещества в верхнем слое моря, что зафиксировано прямыми измерениями.

4) Попадающие на поверхность Черного моря с осадками пылевого аэрозоля кремний и фосфор влияют на биооптические характеристики вод в результате вызывая изменение концентрации хлорофилла-а и первичной продукции. Поступление этих биогенных веществ в воды приводит к временному росту концентрации фитопланктона. Существует небольшая задержка по времени между появлением

пылевого аэрозоля и увеличением суммарного показателя поглощения света. Получена оценка временного сдвига отклика экосистемы открытой части Чёрного моря на осаждение на поверхность вод биогенных веществ, содержащихся в пылевом аэрозоле.

5) При использовании спутниковых данных MODIS и CALIPSO получены оценки влияния прохождения пылевого аэрозоля на содержание в атмосферных выпадениях взвешенных частиц РМ и флюоресценции (ИФ) растворённого органического вещества (РОВ).

Результаты исследований, представленные в Главе 3, опубликованы в работах [Суслин и др., 2016; Калинская, Суслин, 2018; Калинская и др., 2018; Калинская, Рябоконт, 2019; Varenik, et al., 2021; Varenik, Kalinskaya, 2021; Kalinskaya, Parkova, 2022].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена определению влияния трех типов аэрозоля и пространственно-временного положения их источников на биооптические характеристики верхнего слоя Чёрного моря. Комплексный анализ полученных результатов выполнен на основе использования натурных измерений фотометрами CIMEL-318 и SPM, спутниковых измерений приборами MODIS, VIIRS, OLCI, CALIPSO и результатов расчета обратных траекторий переноса воздушных потоков по данным моделирования AERONET и HYSPLIT.

Основные научные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1) Предложен алгоритм определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля, основанный на результатах анализа обратных траекторий ВТА. Показано наличие связи между районом зарождения аэрозоля и специфическими оптическими характеристиками аэрозоля над черноморским регионом; получены карты плотности положения источников аэрозоля и их сезонная и межгодовая изменчивость за период 2007 – 2017. Предложенный алгоритм был использован для подтверждения (совместно с другими критериями) нахождения пылевого и дымового аэрозоля над акваторией Чёрного моря.

2) Для трех основных типов черноморского аэрозоля: фонового, пылевого и дымового получены количественные оценки аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и функции распределения частиц по размерам на основе прямых измерений над Чёрным морем фотометрами SPM и Cimel-31. Фоновому аэрозолю соответствуют значения $AOT = 0,22 \pm 0,05$, $\alpha = 1,3 \pm 0,3$; для пылевого аэрозоля $AOT > 0,3$, $\alpha < 0,8$; а для аэрозоля дыма $AOT = 0,27 \pm 0,03$, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$. Для распределения частиц по размерам в случае наличия в атмосфере фонового и дымового аэрозоля характерно преимущество мелкодисперсных частиц ($dV(r)/d\ln(r) < 1$), а для пылевого аэрозоля - доминирование крупных частиц ($dV(r)/d\ln(r) > 1$).

3) Выявлена сезонная изменчивость выносов аридного аэрозоля для региона Черного моря на примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов (Сахара и Сирия) по данным обратных траекторий двух моделей ВТА (Back Trajectory Analysis) AERONET (Aerosol Robotic Network) и HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). Статистическая обработка данных двух моделей ВТА дала совпадение по двум аспектам: 1) наибольшее количество переносов со стороны пустыни Сахара над Черноморским регионом на трех исследуемых высотах происходит весной; 2) в атмосферном столбе 500 – 3000 м наиболее часто перенос был зарегистрирован на высоте 3 км (слой 700 гПа).

4) Полученные в результате анализа трех типов атмосферного аэрозоля данные позволили получить оценки комплексного влияния на биооптические характеристики поверхностного слоя вод акватории Черного моря как природно-климатических, так и антропогенных факторов.

5) Показано, что все рассмотренные случаи переноса пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря вызывают кратковременное изменение оптических свойств верхнего слоя воды, которое проявляется в увеличении суммарного показателя поглощения света с небольшой задержкой по времени после данного события. Установлены и доказаны причины роста суммарного поглощения света вследствие высоких концентраций биогенных веществ PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в пылевом аэрозоле.

6) Получена оценка отклика экосистемы открытой части Чёрного моря на осаждение на поверхность вод биогенных веществ (PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_2 , NO_3 , NH_4), содержащихся в пылевом аэрозоле, которая проявилась во временном росте концентрации фитопланктона.

7) При использовании спутниковых данных MODIS и CALIPSO получены оценки влияния прохождения пылевого аэрозоля на содержание в атмосферных выпадениях взвешенных частиц (PM), флюоресценции (ИФ) растворённого органического вещества (POB).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AVHRR	– Advanced Very High Resolution Radiometer (усовершенствованный радиометр сверхвысокого разрешения)
ARL	– Air Resources Laboratory (лаборатория исследований ресурсов воздуха)
CINTEX	– Catalog Interoperability Experiment (эксперимент по совместимости каталогов данных)
Envisat	– ENVironment SATellite (спутник по исследованию окружающей среды)
EOSDIS	– Earth Observing System (EOS) Data and Information System (Система информации и данных наблюдений за Землей)
ERS	– European Remote Sensing Satellite (серия европейских спутников дистанционного зондирования), спутники ERS-1 и ERS-2
FIRMS	– Fire Information for Resource Management System (информационная система спутниковых данных о пожарах)
FRP	– Fire Radiative Power (радиационная сила огня)
GMAO	– Global Modeling Assimilation Office (офис ассимиляции данных глобального моделирования)
MERIS	– MEdium Resolution Imaging Spectrometer (спектрометр со средним разрешением)
VIIRS	– Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (комплекс радиометров для получения видимых инфракрасных изображений)
MERRA	– Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (ретроспективный анализ современных приложений и систем для исследований)
MODIS	– Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (спектрорадиометр со средним разрешением)

NASA	– The National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства)
NCEP	– National Centers for Environmental Prediction (Национальные центры экологического прогнозирования)
NOAA	– NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальный комитет по исследованию океана и атмосферы США)
RGB	– аббревиатура английских слов red, green, blue — красный, зелёный, синий
AOT	– Аэрозольная оптическая толщина
ИСЗ	– Искусственный спутник Земли
ИК	–инфракрасный канал
УФ	– ультрафиолетовый канал
КЯМ	– коэффициент яркости моря
AERONET	– Aerosol ROboties NETwork (международная роботизированная сеть фотометров для исследований атмосферных аэрозолей)
HYSPLIT	– Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (Гибридная траекторная модель, основанная на принципах уравнений Лагранжа для одной частицы)
CE-318	– Cimel-318 (солнечный мультиспектральный фотометр, который измеряет прямое и рассеянное излучение Солнца)
ЮБК	– Южный берег Крыма
SILAM	– System for Integrated modeling of Atmospheric composition (система комплексного моделирования состава атмосферы)
PM	– Particulate matter (взвешенные частицы)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив AERONET. – URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 20.01.2015).
2. Архив CALIPSO. – URL: <https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/> (дата обращения 19.12.2020).
3. Архив HYSPLIT. – URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения 20.01.2015).
4. Архив MODIS. – URL: <https://aqua.nasa.gov/modisonet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 05.01.2015).
5. Архив RP5. – URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения 19.12.2020).
6. Архив Ventusky. – URL: <https://www.ventusky.com/> (дата обращения 17.12.2020).
7. Архив GIOVANNI. – URL: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (дата обращения 14.12.2020).
8. Архив Air Resources Laboratory. – URL: <https://ready.arl.noaa.gov> (дата обращения 20.05.2016)
9. Архив FIRMS. – URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (дата обращения 19.01.2018)
10. Автомонов, Е.Г. Мониторинг взвешенных микрочастиц в атмосферном воздухе / Е.Г. Автомонов, О.Д. Галимов // Вологдинские чтения. – 2010. – №78. – С. 209.
11. Агаркова, А.П. Пылевые бури и их прогноз / А.П. Агаркова – М.: Гидрометеиздат. Моск. отд-ние, 1981. – 100 с.
12. Виноградов, В.В. Способ определения расстояния с коррекцией влияния атмосферы / В.В. Виноградов, К.А. Зыков. – Москва: Недра, 1993. – 5 с.
13. Георгиевский, Ю.С. Измерение аэрозольного поглощения в приземном слое атмосферы / Ю.С. Георгиевский, Г.И. Горчаков, А.А. Исаков, М.А. Свириденков // В сб.: Первое всесоюзное совещание по атмосферной оптике. – Томск: Тезисы докладов. – 1976. – Ч.1. – С.234–242.

14. Гинзбург, А.С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А.С. Гинзбург, Д.П. Губанова, В.М. Минашкин // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 112–119.
15. Гинзбург, А.С. Пропускание и отражения света атмосферным слоем поглощающего аэрозоля / А.С. Гинзбург, И.П. Соколик // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1989. – Т.25, №9. – С. 954–959.
16. Голобокова, Л.П. Исследование химического состава атмосферных аэрозолей над акваторией озера Байкал / Л.П. Голобокова, У.Г. Филиппова, И.И. Маринайте, О.Ю. Белозерова, А.Г. Горшков, В.А. Оболкин, В.Л. Потемкин, Т.В. Ходжер // Тезисы докладов XVIII международной школы морской геологии. «Геология морей и океанов». – Москва. – 2009. – С. 9–13.
17. Гришина, Е.П. Основы химии окружающей среды. В 2 ч. Ч. 1. Химические процессы в атмосфере. / Е.П. Гришина // Учебное пособие. – Владимир: ВлГУ, 2006. – 68 с.
18. Гущин, Г.П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы / Г.П. Гущин // Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 200 с.
19. Добровольский, Г.В. Педосфера – оболочка жизни планеты Земля / Г.В. Добровольский // Биосфера. – 2009. – Т. 1, №. 1. – С. 6–14.
20. Донченко, В.А. Атмосферная электрооптика: учебное пособие / В.А. Донченко, М.В. Кабанов, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 220 с.
21. Дубинкина, Е.С. Моделирование аэрозольных полей на основе совместного анализа данных солнечной фотометрии и информации о динамике атмосферы: дисс. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00. 29/ Дубинкина Екатерина Сергеевна. – Екатеринбург, 2015. – 131 с.
22. Емельянов, Е.М. Перенос пыли и её роль в процессе осадкообразования в Атлантическом океане / Е.М. Емельянов, Л.В. Кооль // Литология и полезные ископаемые. – 1979, № 2. – С. 3–15.
23. Зуев, В.Е. Оптика атмосферного аэрозоля / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 255 с.

24. Зуев, В.Е. Статистические методы модели температурных и газовых компонент атмосферы / В.Е. Зуев, В.С. Комаров // Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 264 с.
25. Зуев, В.Е. Современные проблемы атмосферной оптики. Т.2 Оптические модели атмосферы / В.Е. Зуев, Г.М. Креков // Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 256 с.
26. Иванов, А.И. Спектральные измерения поглощения солнечной радиации индустриальной дымкой /А.И. Иванов, И.А. Федулин, В.Н. Коровченко // Метеорология и гидрология. – 1979. – №7. – С. 111–113.
27. Ивлев, Л.С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение / Л.С. Ивлев // Биосфера. – 2013. – Т. 5, №. 2. – С. 182–210.
28. Ивлев, Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей / Л.С. Ивлев // Л.: Изд. ЛГУ, 1982. – 366 с.
29. Ивлев, Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгальчук / СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
30. Кабанов, Д.М. Информационная система для сетевых солнечных фотометров / Д.М. Кабанов, В.В. Веретенников, Ю.В. Воронина, С.М. Сакерин, Ю.С. Турчинович // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, №. 1. – С. 61–67.
31. Кабанов, Д.М. О результатах двухточечных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в нескольких регионах России / Д.М. Кабанов, Г.С. Жамсуева, А.С. Заяханов, Г.И. Корниенко, С.А. Нагуслаев, А.Н. Павлов, М.В. Панченко, Д.А. Пестунов, С.М. Сакерин, К.А. Шмирко // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, №. 11. – С. 960–971. EDN: WYOTVJ. DOI: 10.15372/AOO20161110.
32. Кабанов, Д.М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК диапазоне спектра / Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – №. 8. – С. 866–874.

33. Кабанов, Д.М. Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч.1. / Кабанов, Д.М., Сакерин, С.М. // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – №. 6. – С. 852–860.
34. Кабанов, М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Часть III. Атмосферный аэрозоль / М.В. Кабанов, М.В. Панченко. – Издание Томского филиала СО РАН, 1984. – 189 с.
35. Калинская, Д.В. Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над черным морем / Д.В. Калинская // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – № 26 (2). – С. 151–162.
36. Калинская, Д.В. Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий / Д.В. Калинская, В.В. Суслин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 59–67.
37. Калинская, Д.В. Исследование свойств аэрозолей над Чёрным морем во время события пылевой бури 2015 года / Д.В. Калинская, В.В. Суслин // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2016. – № 3. – С. 37–43.
38. Суслин, В.В. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В.В. Суслин, В.Х. Слабакова, Д.В. Калинская, С.Ф. Пряхина, Н.И. Головкин // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – № 1 (187). – С. 20–32.
39. Калинская, Д.В. Анализ оптических характеристик атмосферного аэрозоля за экспедиционный период с 24 мая по 5 июня 2016 г / Д.В. Калинская, С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов Д.М. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2017. – № 2. – С. 20–25.
40. Калинская, Д.В. Результаты измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в черноморском регионе (2015-2016) / Д.В. Калинская, Д.М. Кабанов, А.А. Латушкин, С.М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 6. – С. 489–496. EDN: YTZDJT. DOI: 10.15372/AOO20170607.

41. Калинская, Д.В. Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над черноморским регионом / Д.В. Калинская, А.В. Вареник, А.С. Папкова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 217–225. EDN: XSNFSP. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225.

42. Калинская, Д.В. Исследование характеристик аэрозолей над Чёрным морем посредством системы FIRMS во время пожаров за период 2007–2018 гг. / Д.В. Калинская, Д.А. Рябоконь // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 247–255. EDN: KOITGA. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-247-255.

43. Калинская, Д. В. Методика определения источников приземного аэрозоля на основе результатов данных моделей AERONET и HYSPLIT / Д.В. Калинская, О.Б. Кудинов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIII Международного симпозиума. Электронный ресурс Томск: Издательство ИОА СО РАН. Кондратьев, К.Я., Григорьев, Ал.А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики. Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 4. – С. 279–292.

44. Кондратьев, К.Я. Глобальные изменения климата и круговорот углерода / К.Я. Кондратьев, К.С. Демирчан // Изв. РГО. – 2000. – Т. 132, № 4. – С. 1–20.

45. Кондратьев, К.Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы / К.Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 1. – С. 5–24.

46. Кондратьев, К.Я. Атмосферный аэрозоль полярных районов / К.Я. Кондратьев, В. И. Биненко // Первый глобальный эксперимент–ПИГАП. – 1981. – Т. 2. – С. 92–100.

47. Кондратьев, К.Я. Глобальный климат / К.Я. Кондратьев // СПб.: Наука, 1992. – 358 с.

48. Кондратьев, К.Я. Радиационные факторы современных изменений глобального климата / К.Я. Кондратьев // Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 279 с.

49. Кондратьев, К.Я. Атмосферный аэрозоль / К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, Д.В. Поздняков // Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 224с.
50. Копелевич, О.В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета / О.В. Копелевич, В.И. Буренков, С.В. Шеберстов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 3, № 2. – С. 99–105.
51. Копелевич, О.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О.В. Копелевич, И.В. Салинг, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец, С.В. Шеберстов, В.И. Буренков, А.В. Юшманова // М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ». – 2018. – 140с.
52. Копелевич, О.В. Подводное световое поле в поверхностном слое Баренцева моря и спектральный коэффициент яркости водной толщи при различных океанологических условиях / О.В. Копелевич, С.В. Шеберстов, С.В. Вазюля // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва. – 2020. – С. 216–216.
53. Краснощёков, К.В. Оценка качества атмосферного воздуха по спутниковым данным / К.В. Краснощёков, О.Э. Якубайлик // Региональные проблемы дистанционного зондирования земли. – 2020. – С. 236–239.
54. Кузнецова, И.Н. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы / И.Н. Кузнецова, А.А. Глазкова, И.Ю. Шалыгина, М.И. Нахаев, А.А. Архангельская, А.М. Звягинцев, Е.Г. Семутникова, П.В. Захарова, Е.А. Лезина // Оптика атмосф. и океана. – 2014. – Т. 27, № 2. – С. 473–482.
55. Лившиц, Г.Ш. Рассеянный свет дневного неба / Г.Ш. Лившиц // Алма-Ата: Наука, 1973. – 148с.
56. Лисицын, А.П. Маргинальный фильтр океанов / А.П. Лисицын // Океанология. – 1994. – Т. 34, № 5. – С. 735–747.

57. Лисицын, А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы / А.П. Лисицын // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 10. – С. 1398–1439.
58. Лисицын, А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли. Мировой океан. Т. 2. Физика, химия, и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / А.П. Лисицын // М.: Научный мир. – 2014. – С. 331–571.
59. Макарова, Е.А Поток солнечного излучения / Е.А. Макарова, А.В. Харитонов, Т.В. Казачевская // М.: Наука, 1991. – 400 с.
60. Мак-Картни, Э. Оптика атмосферы / Э. Мак-Картни // М.: Мир, 1979. – 421с.
61. Монин, А. С. Климат как проблема физики / А. С. Монин, Ю. А. Шишков // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 4. – С. 419–445.
62. Орехова, Н. А. Режим биогенных элементов Черного моря / Н. А. Орехова // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37, № 6 (222). – С. 710–726. EDN: EFDKRY. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-6-710-726.
63. Павлов, В. Е. Корреляционные связи между концентрациями ряда ионов в растворимых аэрозолях приземного воздуха на Азиатском континенте / В.Е. Павлов, Л. П. Голобокова, Г. С. Жамсуева, А.С. Заяханов, У.Г. Филиппова, И.В. Хвостов, Т.В. Ходжер // Аэрозоли Сибири : Тезисы докладов XVII Рабочей группы, Томск, 23–26 ноября 2010 года. – Томск: Институт оптики, 2010. – С. 64. – EDN RTOLDF.
64. Павлов, В.Е. Аэрозольные оптические толщи и яркость неба в ИК-области спектра в аридных зонах земного шара / В.Е. Павлов, А.С. Шестухин // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 3. – С. 252–255.
65. Поддубный, В.А. Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий / В.А. Поддубный, Е.С. Наговицына // Известия

Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 439–439. EDN: QIWSEN. DOI: 10.7868/S000235151304007X.

66. Пясковская-Фесенкова, Е.В. Исследование рассеяния дневного света в атмосфере / Е.В. Пясковская-Фесенкова // М.: Изд. АН СССР, 1957. – 219 с.

67. Ревич, Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов / Б.А. Ревич // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29, № 3. – С. 53–78. EDN: YRXUVF. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78.

68. Розенберг, Г.В. О новом явлении в рассеянном свете сумеречного неба / Г.В. Розенберг // Докл. АН СССР. – 1942. – Т. 36, № 9. – С. 288–293.

69. Розенберг, Г.В. Сумерки / Г.В. Розенберг // М.: ГИФМЛ, 1963. – 380 с.

70. Розенберг, Г.В. О сумеречных исследованиях планетных атмосфер с космических кораблей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1965. – Т. 1, № 4. – С. 377–385.

71. Розенберг, Г.В. Стратосферный аэрозоль по измерениям с космического корабля / Г.В. Розенберг, В.В. Николаева-Терешкова // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1965. – Т. 1, № 4. – С. 386–394.

72. Розенберг, Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат / Г.В. Розенберг // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. – 1982. – Т. 18, №. 11. – С. 1192.

73. Розенберг, Г.В. Оптические параметры атмосферного аэрозоля. Физика атмосферы и проблемы климата. / Г.В. Розенберг, Г.И. Горчаков, Георгиевский, Ю.С. Любовцева М.: – Наука, 1980. – 262 с.

74. Роул, А. Основные принципы анализа размеров частиц / А. Роул // Техническая аннотация. – Malvern Instruments Limited, 2009. – 12 с.

75. Сакерин, С.М. Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних Арктических районах / С.М. Сакерин, Л.П. Голобокова, Д.М. Кабанов, В.С. Козлов, В.В. Полькин, В.Ф. Радионов, Д.Г. Чернов // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, №. 8. – С. 640–646. EDN: XUKUGT. DOI: 10.15372/AOO20180807.

76. Сакерин, С.М. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы на маршруте 42-го рейса НИС «Академик Борис Петров» / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, №. 8. – С. 640–646. EDN: YMJUEW. DOI: 10.15372/AOO20180102.

77. Сакерин, С.М. О широтной зависимости и взаимосвязях характеристик аэрозоля в атмосфере Южной Атлантики / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, М.В. Панченко, В.В. Польшин // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, №. 7. – С. 611–621.

78. Сакерин, С.М. Сравнительный анализ характеристик атмосферного аэрозоля над Арктическими морями России / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, В.В. Польшин, Д.Г. Чернов, П.Н. Зенкова, В.С. Козлов, В.В. Польшин, С.А. Терпугов, М.В. Панченко, В.Ф. Радионов, А.С. Кессель, А.П. Лисицын, В.П. Шевченко, Н.В. Политова // Моря России: наука, безопасность, ресурсы. Тезисы докладов научной конференции. – 2017. – С. 76.

79. Сакерин, С.М. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы / С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, А.П. Ростов, С. А. Турчинович, Ю. С. Турчинович // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, №. 4. – С. 354–369.

80. Сакерин, С. М. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С. М. Сакерин, Д. М. Кабанов, А. П. Ростов, С. А. Турчинович, В. В. Князев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 12. – С. 1112–1117.

81. Сакерин, С. М. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» / С. М. Сакерин, Л. П. Голобокова, Д. М. Кабанов, В. В. Польшин, Ю. С. Турчинович, Т. В. Ходжер, О. И. Хуриганова // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 42–52. – EDN: XHNRKJ. – DOI: 10.15372/AOO20170106.

82. Седунов, Ю. С. Атмосфера : справочник / Ю. С. Седунов, С. И. Авдюшин, Н. Н. Петров. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 510 с. – ISBN 5-286-00245-5.

83. Сидоров, В. Н. Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое / В. Н. Сидоров // Труды Международной конференции «Физика атмосферного аэрозоля». – Москва: Диалог-МГУ, 1999. – С. 356–367.
84. Смеркалов, В. А. Прикладная оптика атмосферы / В. А. Смеркалов. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1997. – 334 с.
85. Смирнов, А. В. Статистика спектральной прозрачности атмосферы над морем / А. В. Смирнов, К. С. Шифрин // Физика приземного слоя атмосферы и прикладные аспекты: сборник научных трудов. – Ленинград: ЛПИ, 1984. – С. 121–125.
86. Смирнов, В. В. Природа и эволюция сверхмалых аэрозольных частиц в атмосфере / В. В. Смирнов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 6. – С. 723–748.
87. Суетин, В. С. Оценка особенностей изменчивости оптических свойств вод Чёрного моря по данным спутниковых приборов SeaWiFS и MODIS / В. С. Суетин, С. Н. Королёв // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34, № 4 (202). – С. 357–368. – EDN: YMQLXF. – DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-357-368.
88. Суетин, В. С. Проявления атмосферных искажений в данных спутникового прибора SeaWiFS в окрестности океанографической платформы в Кацивели летом 2002 г. / В. С. Суетин, С. Н. Королёв, В. В. Суслин, А.А. Кучерявый // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа : сборник научных трудов. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 174–183.
89. Суетин, В. С. Уточнённая интерпретация данных наблюдений Чёрного моря спутниковым прибором SeaWiFS осенью 1998 года / В. С. Суетин, С.Н. Королёв, В.В. Суслин, А.А. Кучерявый// Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 2. – С. 68–79.
90. Суетин, В. С. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Чёрным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS / В. С. Суетин, С. Н. Королёв, В. В. Суслин, А. А. Кучерявый // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 69–79.

91. Суковатов, К. Ю. Сравнительный анализ вычислительных методов расчёта интенсивности рассеянного излучения для мониторинга климатических и экологических систем / К. Ю. Суковатов // Мир науки, культуры и образования. – 2009. – Т. 17, № 5. – С. 6–8.
92. Суслин, В. В. Оптические свойства аэрозоля над Чёрным морем по данным цветковых сканеров и сети AERONET / В. В. Суслин, В. Слабакова, Д. В. Калининская // Современные проблемы оптики естественных вод : сборник научных трудов. – 2015. – Т. 8. – С. 245–250.
93. Суслин, В. В. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин, В.Х. Слабакова, Д.В. Калининская, С.Ф. Пряхина, Н.И. Головкин // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – Т. 187, № 1. – С. 20–32.
94. Сушкевич, Т. А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе / Т. А. Сушкевич // Труды ИПМ АН СССР. О-572-66. – Москва: ИПМ АН СССР, 1966. – 180 с.
95. Сушко, Б. К. Анализатор электрических подвижностей аэрозолей – прибор для измерения запылённости атмосферы / Б. К. Сушко // Материалы XLII Международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАУ, 2003. – Ч. 3. – С. 145–150.
96. Сушко, Б. К. Ориентационные эффекты при электрооптическом рассеянии света в несферических аэрозолях / Б. К. Сушко // Труды Стерлитамакского филиала АН РБ. Серия «Физико-математические и технические науки». – Уфа: Гилем, 2001. – Вып. 2. – С. 277–280.
97. Тимофеев, Ю. М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А. В. Васильев. – Санкт-Петербург: Наука, 2003.
98. Толкаченко, Г. А. Оценка пространственных масштабов аэрозольной атмосферы над акваторией Чёрного моря / Г. А. Толкаченко, Д. В. Калининская, А. В. Смирнов, Ю. А. Прохоренко // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 69–79.

99. Фишер, В. Л. Методы выявления золоторудных месторождений в условиях северо-восточного Забайкалья / В. Л. Фишер // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1968. – Т. 134. – С. 202–207.

100. Чен, Б. Б. Слои мелкомасштабных частиц аэрозоля и перенос радиации в атмосфере региона. Ч. 2. Влияние слоёв на перенос радиации и их вклад в региональные климатические изменения / Б. Б. Чен, С. И. Попель, В. В. Адушкин, О. М. Стрижанцева, Ф. Голоуб, П. Г. Вайдлер // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2018. – Т. 18, № 12. – С. 174–183.

101. Шевченко, В. П. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане / В. П. Шевченко, А. А. Виноградова, А. П. Лисицын, А. Н. Новигатский, Н. В. Горюнова // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. – 2009. – С. 150.

102. Шевченко, В. П. Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря / В. П. Шевченко, Д. П. Стародымова, А. А. Виноградова, А. П. Лисицын, В. И. Макаров, С. А. Попова, В. В. Сивонен, В. П. Сивонен // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461, № 1. – С. 70–74.

103. Шевченко, В. П. Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря / В. П. Шевченко, Д. П. Стародымова, А. А. Виноградова, А. П. Лисицын, В. И. Макаров, С. А. Попова, В. В. Сивонен, В. П. Сивонен // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 461, № 1. – С. 70–74. – EDN: ТРҮСВН. – DOI: 10.7868/S086956521507021X.

104. Шибанов, Е. Б. Особенности использования алгоритмов атмосферной коррекции для восстановления яркости Чёрного моря в дни пылевых переносов по спутниковым данным MODIS / Е. Б. Шибанов, А.С. Папкина, Д.В. Калинская // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 7 (402). – С. 532–538. – EDN: JGAINQ. – DOI: 10.15372/AOO20220703.

105. Юнге, Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Х. Юнге. – Москва: Мир, 1965. – 424 с.
106. Яковлева, Д. В. Исследование дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над Чёрным морем / Д. В. Яковлева, Г. А. Толкаченко // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сборник научных трудов. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 212–223.
107. Яковлева, Д. В. Сезонная и межгодовая изменчивость оптических характеристик атмосферы над Чёрным морем в районе Севастополя в период 2006–2008 года / Д. В. Яковлева, Г. А. Толкаченко, Б. Н. Холбен, А. В. Смирнов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа : сборник научных трудов. – 2009. – № 18. – С. 205–212.
108. Angstrom, A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air / A. Angstrom // Geograf. Annaler. – 1929. – N 11. – P. 156–166.
109. Chen, Y., Velicogna, I., Famiglietti, J. S., Randerson, J. T. Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon / Y. Chen, I. Velicogna, J. S. Famiglietti, J. T. Randerson // J. Geophys. Res. Biogeosci. – 2013. – V. 118. – P. 495–504. DOI:10.1002.jgrg.20046.
110. Chu, D. A. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land / D. A. Chu, Y. J. Kaufman, C. Ichoku, L. A. Remer, D. Tanré, B. N. Holben // Geophysical Research Letters. – 2002. – Vol. 29, № 12. – P. MOD2-1–MOD2-4. DOI: 10.1029/2001GL013205.
111. Chuvieco, E. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data / E. Chuvieco, L. Giglio, C. Justice // Global Change Biology. – 2008. – Vol. 14. – P. 1488–1502. – DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x.
112. Dubovik, O. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations / O. Dubovik, B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, I. Slutsker // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2002. – Vol. 59. – P. 590–608.

113. Dubovik, O. A flexible inversion algorithm for the retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements / O. Dubovik, M. D. King // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – P. 20 673–20 696.

114. Dubovik, O. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements / O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck, I. Slutsker // *Journal of Geophysical Research*. – 2000. – Vol. 105. – P. 9791–9806.

115. Duce, R. A. The atmospheric input of trace species to the world ocean / R. A. Duce, P. S. Liss, J. T. Merrill, E. L. Atlas, P. Buat-Menard, B. B. Hicks, M. Zhou // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1991. – Vol. 5, № 3. – P. 193–259.

116. Eck, T. F. Observations of the interaction and transport of fine mode aerosols with cloud and or fog in Northeast Asia from Aerosol Robotic Network and satellite remote sensing / T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, P. Xian, D. M. Giles, A. Sinyuk // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – Vol. 123. – P. 5560–5587 DOI: 10.1029/2018JD028313.

117. Eck, T. F. Observations of rapid aerosol optical depth enhancements in the vicinity of polluted cumulus clouds / T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, A. Arola, R. A. Ferrare, C. A. Hostetler, S. N. Crumeyrolle, T. A. Berkoff, E. J. Welton, S. Lolli, A. Lyapustin, Y. Wang, J. S. Schafer, D. M. Giles, B. E. Anderson, K. L. Thornhill, P. Minnis, K. E. Pickering, C. P. Loughner, A. Smirnov, A. Sinyuk // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. – P. 11 633–11 656. – DOI: 10.5194/acp-14-11633-2014.

118. Fleming, Z. L. Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition / Z. L. Fleming, P. S. Monks, A. J. Manning // *Atmospheric Research*. – 2012. – Vol. 104. – P. 1–39.

119. Gallisai, R. Mediterranean basin-wide correlations between Saharan dust deposition and ocean chlorophyll concentration / R. Gallisai, F. Peters, S. Basart, J. M. Baldasano // *Biogeosciences Discussions*. – 2012. – Vol. 9, № 7. – P. 8611–8639.

120. Gallisai, R. Large Saharan dust storms: Implications for chlorophyll dynamics in the Mediterranean Sea / R. Gallisai, G. Volpe, F. Peters // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2016. – Vol. 30, № 11. – P. 1725–1737.
121. Glasius, M. Fossil and nonfossil carbon in fine particulate matter: A study of five European cities / M. Glasius, A. Cour, C. Lohse // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116, № D11302. – P. 1244–1254. DOI: 10.1029/2011JD015646.
122. Gordon, H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm / H. Gordon, R. M. Wang // *Applied Optics*. – 1994. – Vol. 33. – P. 443–452.
123. Guieu, C. Atmospheric input of dissolved and particulate metals to the north-western Mediterranean / C. Guieu, R. Chester, M. Nimmo, J. -M. Martin, S. Guerzoni, E. Nikolas, J. Mateu, S. Keyse // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. – 1997. – Vol. 44, № 3–4. – P. 855–874.
124. Guieu, C. Spatial variability of atmospheric fluxes of metals (Al, Fe, Cd, Zn and Pb) and phosphorus over the whole Mediterranean from a one-year monitoring experiment: Biogeochemical implications / C. Guieu, M. -D. Loÿe-Pilot, L. Benyahya, A. Dufour // *Marine Chemistry*. – 2010. – Vol. 120. – P. 164–178.
125. Holben, B. N. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buts, A. Setzer, F. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajama, F. Lavenue, I. Jankoviak, A. Smirnov // *Remote Sensing of Environment*. – 1998. – № 66. – P. 1–16.
126. Holben, B. N. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET / B. N. Holben, D. Tanré, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. Vande Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karnieli, N. T. O'Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, G. Zibordi // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – Vol. 106. – P. 12 0670–12 097.
127. Ichoku, C. Fire and Smoke Remote Sensing and Modeling Uncertainties: Case Studies in Northern Sub-Saharan Africa / C. Ichoku, L. T. Ellison, Y. Yue, J. Wang,

J. W. Kaiser // Geophysical Monograph Series. – 2016. – Vol. 223. – P. 215–230. – DOI: 10.1002/9781119028116.ch14.

128. IOCCG. Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products / M. Wang (ed.) // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. – 2010. – № 10. – IOCCG, Dartmouth, Canada. 84p.

129. IOCCG. Mission Requirements for Future Ocean-Colour Sensors / C. R. McClain, G. Meister (eds.) // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. – 2012. – № 13. – 106pp. – IOCCG, Dartmouth, Canada.

130. Ito, A. Seasonal and interannual variations in CO and BC emissions from open biomass burning in Southern Africa during 1998–2005 / A. Ito, H. Akimoto // Global Biogeochemical Cycles. – 2007. – Vol. 21. – P. GB2011 – DOI: 10.1029/2006GB002848.

131. Ito, A. Global modeling analysis of tropospheric ozone and its radiative forcing from biomass burning emissions in the twentieth century / A. Ito, K. Sudo, H. Akimoto, S. Sillman, J. E. Penner // Journal of Geophysical Research. – 2007. – Vol. 112. – P. D24307. – DOI: 10.1029/2007JD008745.

132. Ji, Y. E. Stocker Reply to comment by L. Giglio et al. on Seasonal, inter-seasonal, and interannual variability of global land fires and their effects on atmospheric aerosol distribution / Y. E. Ji // Journal of Geophysical Research. – 2003. – Vol. 108, № D24. – 4755 p. – DOI: 10.1029/2003JD004115.

133. Jickells, T. Atmospheric inputs of metals and nutrients to the oceans: their magnitude and effects / T. Jickells // Marine Chemistry. – 1995. – Vol. 48, № 3–4. – P. 199–214.

134. Justice, C. O. Global fire products from MODIS / C. O. Justice, L. Giglio, S. Korontzi, D. Roy, J. Owens, S. Alleaume, J. Morissette, D. Roy, F. Petitcolin, J. Descloitres, Y. Kaufman // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 83. – P. 245–263.

135. Kalinskaya, D. V. Research of the aerosol optical and microphysical characteristics of the atmosphere over the Black Sea region by the FIRMS system during the

forest fires in 2018–2019 / D. V. Kalinskaya, A. S. Papkova, D. M. Kabanov // *Physical Oceanography*. – 2020. – Vol. 36, № 5. P. 514–524.

136. Kalinskaya, D. V. Influence of atmospheric transport of suspended PM₁₀ particles on the optical characteristics of the surface layer of the Black Sea / D. V. Kalinskaya, O. B. Kudinov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2021. – Vol. 34. – P. 205–211.

137. Kalinskaya, D. V. Why is it important to consider dust aerosol in the Sevastopol and Black Sea region during remote sensing tasks? A case study / D. V. Kalinskaya, A. S. Papkova // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, № 8. – P. 1890.

138. Kalinskaya, D. V. Impact of the cyclone on spatial distribution of the smoke aerosol resulted from the fires in May, 2021 / D. V. Kalinskaya // *Physical Oceanography*. – 2 Newton. – Vol. 29, № 3. – P. 303–319.

139. Kalinskaya, D. V. Variability of the water-leaving radiance under conditions of dust transport by the Sentinel-3 satellite data on the example of the Black Sea and Sevastopol city, 2023 / D. V. Kalinskaya, A. S. Papkova // *Physical Oceanography*. – 2023. – Vol. 30, № 3. – P. 369–383.

140. Korchemkina, E. N. Algorithm of additional correction of level 2 remote sensing reflectance data using modelling of the optical properties of the Black Sea waters / E. N. Korchemkina, D. V. Kalinskaya // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, № 4. – P. 831.

141. Koren, I. The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest / I. Koren, Y. Kaufman, R. Washington, M. Todd, Y. Rudich, V. Martins, D. Rosenfeld // *Environmental Research Letters*. – Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2006. – Vol. 1, № 1. – P. 014005.

142. Kokhanovsky, A. A. Aerosol optics: light absorption and scattering by particles in the atmosphere / A. A. Kokhanovsky. – Springer Science & Business Media, 2008. – P.48–83. – DOI:10.1007/978-3-540-49909-1_3

143. Kopelevich, O. V. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian seas / O. V. Kopelevich [et

al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2004. – Vol. 51, № 10–11. – P. 1063–1091.

144. Kubilay, N. Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean / N. Kubilay, T. Cokacar, T. Oguz // Journal of Geophysical Research. – 2003. – Vol. 108, № D21. – 4666. – DOI: 10.1029/2003JD003798.

145. Lyapustin, A. MAIAC – Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS / A. Lyapustin, Y. Wang // AGU Spring Meeting Abstracts. – 2007. – Vol. 2007. – P. A51B-05.

146. Migon, C. Phosphorus in rainwater: partitioning inputs and impact on the surface coastal ocean / C. Migon, V. Sandroni // Limnology and Oceanography. – 1999. – Vol. 44, № 4. – P. 1160–1165.

147. Mielonen, T. Comparison of CALIOP level 2 aerosol subtypes to aerosol types derived from AERONET inversion data / T. Mielonen, A. Arola, M. Komppula, J. Kukkonen, J. Koskinen, G. de Leeuw, K. E. J. Lehtinen // Geophysical Research Letters. – 2009. – Vol. 36. – L18804. – DOI: 10.1029/2009GL039609.

148. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) Aqua ocean color data; 2018 reprocessing / NASA OB.DAAC. – Greenbelt, MD, USA, 2018. – [Электронный ресурс] . – DOI: 10.5067/AQUA.MODIS.L2.OC.2018.

149. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) Aqua downwelling diffuse attenuation coefficient data; 2018 reprocessing / NASA OB.DAAC. – Greenbelt, MD, USA, 2018. – P.023525. – DOI: 10.5067/AQUA.MODIS.L3B.KD.2018.

150. Omar, A. H. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements / A. H. Omar, J. G. Won, D. M. Winker, S. C. Yoon, O. Dubovik, M. P. McCormick // Journal of Geophysical Research. – 2005. – Vol. 110, № D10S14. – DOI: 10.1029/2004JD004874.

151. Omar, A. H. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A. H. Omar, D. M. Winker, M. A. Vaughan, Y. Trept, C. R. Hu,

R. A. Ferrare, K. Lee, C. A. Hostetler, C. Kittaka, R. R. Rogers, R. E. Kuehn, Z. Liu // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2009. – Vol. 26. – P. 1994–2014. – DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1.

152. Omar, N. Y. M. Levels and distributions of organic source tracers in air and roadside dust particles of Kuala Lumpur, Malaysia / N. Y. M. Omar, M. R. B. Abas, N. A. Rahman, N. M. Tahir, A. I. Rushdi, B. R. Simoneit // *Environmental Geology*. – 2007. – Vol. 52. – P. 1485–1500.

153. O'Neill, N. T. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth / N. T. O'Neill, T. F. Eck, A. Smirnov, B. N. Holben, S. Thulasiraman // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, № D17. – P. 4559.

154. Panchenko, M. V. Some peculiarities of the mutual variability of the content of soot and submicron aerosol in the near-ground air layer / M. V. Panchenko, V. S. Kozlov, A. G. Tumakov, V. P. Shmargunov, E. P. Yausheva // *Journal of Aerosol Science*. – 1997. – Vol. 28, Suppl. 1. – P. 231–232.

155. Panchenko, M. V. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer / M. V. Panchenko, T. B. Zhuravleva, S. A. Terpugova, V. V. Polkin, V. S. Kozlov // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2012. – Vol. 5, № 7. – P. 1513–1527.

156. Papkova, A. S. The effect of dust aerosol on satellite data from different color scanners / A. S. Papkova, E. B. Shybanov, D. V. Kalinskaya // *Physical Oceanography*. – 2024. – Vol. 31, № 5. – P. 720–735.

157. Papkova, A. S. Identification optical characteristics of dust aerosol by remote sensing methods in the infrared region of the spectrum / A. S. Papkova, D. V. Kalinskaya, J. I. Papkova // *Memoirs of the Faculty of Physics*. – 2020. – № 3.

158. Rap, A. Fires increase Amazon forest productivity through increases in diffuse radiation / A. Rap, D. V. Spracklen, L. Mercado, C. L. Reddington, J. M. Haywood, R. J. Ellis, O. L. Phillips, P. Artaxo, D. Bonal, N. Restrepo Coupe, N. F. Butt // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42, № 11. – P. 4654–4662. – DOI: 10.1002/2015GL063719.

159. Rabalais, N. N. Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf / N. N. Rabalais, R. E. Turner, D. Justić, Q. Dortch, W. J. Wiseman, B. K. Sen Gupta // *Estuaries*. – 1996. – Vol. 19, № 2. – P. 386–407.
160. Sakerin, S. M. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along the Northern Sea Route / S. M. Sakerin, A. A. Bobrikov, O. A. Bukin, L. P. Golobokova, Vas. V. Pol'kin, Vik. V. Pol'kin, K. A. Shmirko, D. M. Kabanov, T. V. Khodzher, N. A. Onischuk, A. N. Pavlov, V. L. Potemkin, V. F. Radionov // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – Vol. 15. – P. 12413–12443.
161. Sandroni, V. Dry atmospheric deposition and diazotrophy as sources of new nitrogen to northwestern Mediterranean oligotrophic surface waters / V. Sandroni, P. Raimbault, C. Migon, N. Garcia, E. Gouze // *Deep-Sea Research*. – 2007. – Vol. 54. – P. 1859–1870.
162. Shkinev, V. M. A set of analytical methods for the estimation of elemental and grain-size composition of volcanic ash / V. M. Shkinev, M. S. Ermolin, P. S. Fedotov // *Geochemistry International*. – 2016. – Vol. 54, № 13. – P. 1252.
163. Shybanov, E. B. Algorithm for Additional Correction of Remote Sensing Reflectance in the Presence of Absorbing Aerosol: Case Study / E. B. Shybanov, A. S. Papkova // *Physical Oceanography*. – 2022. – T. 29. – № 6. – C. 688-706.
164. Smirnov, A. Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network / A. Smirnov, B. N. Holben, I. Slutsker, D. M. Giles, C. R. McClain, T. F. Eck, F. Jourdin // Maritime aerosol network as a component of aerosol robotic network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D6). // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114, № D06204. – DOI: 10.1029/2008JD011257.
165. Smirnov, A. Maritime component in aerosol optical models derived from Aerosol Robotic Network data / A. Smirnov, B. N. Holben, O. Dubovik, R. Frouin, T. F. Eck, I. Slutsker // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, № D1. – P. 4033. – DOI: 10.1029/2002JD002701.

166. Smirnov, A. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database / A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, I. Slutsker, B. Chatenet, R. T. Pinker // *Remote Sensing of Environment*. – 2000. – Vol. 73. – P. 337–349.
167. Smirnov, A. Diurnal variability of aerosol optical depth observed at AERONET (Aerosol Robotic Network) sites / A. Smirnov, B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, B. Chatenet, R. T. Pinker // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29, № 23. – P. 2115. – DOI: 10.1029/2002GL016305.
168. Smirnov, A. A study of the link between synoptic air mass type and atmospheric optical parameters / A. Smirnov, A. Royer, N. T. O'Neill, A. Tarussov // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99. – P. 20967–20982.
169. Smirnov, A. Measurement of atmospheric optical parameters on U.S. Atlantic coast sites, ships, and Bermuda during TARFOX / A. Smirnov, B. N. Holben, O. Dubovik, N. T. O'Neill, L. A. Remer, T. F. Eck, S. Kinne, I. Slutsker, D. Savoie // *Journal of Geophysical Research*. – 2 Newton. – Vol. 105, № D8. – P. 9887–9901.
170. Suetin, V. S. Improved interpretation of the data of observations of the Black Sea by a SeaWiFS satellite instrument in autumn 1998 / V. S. Suetin, S. N. Korolev, V. V. Suslin, A. A. Kucheryavyi // *Physical Oceanography*. – 2008. – Vol. 18, № 2. – P. 106–115.
171. Suslin, V. V. Impact of optically active layers in the Black Sea on the quality of retrieved ocean color products: modeling and satellite observations / V. V. Suslin, K. I. Gurov // *Proceedings of SPIE: 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – Bellingham, WA, USA, 2017. – Vol. 10466 (AOO16 – Atmospheric Physics and Climate).
172. Suslin, V. V. Desert dust effects in the results of atmospheric correction of satellite sea color observations / V. V. Suslin, V. S. Suetin, S. N. Korolev, A. A. Kucheryavyi // *Current Problems in Optics of Natural Waters: Proceedings of the 4th International Conference (Nizhny Novgorod, September 11–15, 2007)*. – Nizhny Novgorod, 2007. – P. 184–187.

173. Tansey, K. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia / K. Tansey, J. Beston, A. Hoscilo, S. E. Page, C. U. Paredes Hernández // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – Vol. 113, № D23112. – DOI: 10.1029/2008JD010717.
174. Tréguer, P. J. The world ocean silica cycle / P. J. Tréguer, C. L. De La Rocha // *Annual Review of Marine Science*. – 2013. – Vol. 5. – P. 477–501.
175. Tréguer, P. J. The silica balance in the world ocean: a reestimate / P. J. Tréguer, D. M. Nelson, A. J. Van Bennekom, D. J. DeMaster, A. Leynaert, B. Quéguiner // *Science*. – 1995. – Vol. 268, № 5209. – P. 375–379.
176. Varenik, A. V. Investigation of airborne particulate matter in the atmosphere of the Black Sea coastal zone based on the measured and satellite data / A. V. Varenik, D. V. Kalinskaya, M. A. Myslina // *Physical Oceanography*. – 2021. – Vol. 28, № 3. – P. 326–337.
177. Varenik, A. V. The effect of dust transport on the concentration of chlorophyll-a in the surface layer of the Black Sea / A. V. Varenik, D. V. Kalinskaya // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, № 10. – P. 4692.
178. Vaughan, M. Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements / M. Vaughan, K. Powell, R. Kuehn, S. Young, D. Winker, C. Hostetler, W. Hunt, Z. Liu, M. McGill, B. Getzewich // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2009. – Vol. 26. – P. 2034–2050. – DOI: 10.1175/2009JTECHA1228.1.
179. Vermote, E. F. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results / E. F. Vermote, N. Z. El Saleous, C. O. Justice // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 83, № 1–2. – P. 97–111.
180. Werdell, P. J. The Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem mission: status, science, advances / P. J. Werdell, M. J. Behrenfeld, P. S. Bontempi, E. Boss, B. Cairns, G. T. Davis, L. A. Remer // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2019. – Vol. 100, № 9. – P. 1775–1794.
181. Williams, M. M. R. Aerosol science: theory and practice / M. M. R. Williams, S. K. Loyalka. – Oxford: Pergamon Press, 1991. – 466p.

182. Wooster, M. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release / M. J. Wooster, G. Roberts, G. L. W. Perry, Y. J. Kaufman // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2005. – Vol. 110, № D24.

183. Yakovleva, D. V. Features of diurnal variability of aerosol optical depth over the Black Sea / D. V. Yakovleva, G. A. Tolkachenko // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET): Proceedings of the 12th International Conference*. – 2008. – P. 369–371.

184. Young, R. W. Atmospheric iron inputs and primary productivity: Phytoplankton responses in the North Pacific / R. W. Young, K. L. Carder, P. R. Betzer, D. K. Costello, R. A. Duce, G. R. DiTullio, N. W. Tindale, E. A. Laws, M. Uematsu, J. T. Merrill, R. A. Feely // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1991. – Vol. 5. – P. 119–134. – DOI: 10.1029/91GB00927.

185. Zibordi, G. In situ autonomous optical radiometry measurements for satellite ocean color validation in the Western Black Sea / G. Zibordi, F. Mélin, J. -F. Berthon, M. Talone // *Ocean Science*. – 2015. – Vol. 11. – P. 275–286. – DOI: 10.5194/os-11-275-2015.