

Научная статья
УДК 504.3.054
EDN AIMHIF

Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за 2022–2024 годы

Д. В. Калинская^{1, 2 *}, А. А. Мольков^{1, 3}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

³ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия

* e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты комплексного анализа атмосферного аэрозоля с использованием натурных фотометрических измерений *SPM*, спутниковых данных *MODIS* (*Aqua/Terra*), *VIIRS*, а также моделирования траекторий перемещения воздушных потоков *HYSPLIT*, проведенного в рамках сопоставления оптических характеристик атмосферного аэрозоля над регионом Черного моря и водохранилищами бассейна р. Волги (Горьковским, Чебоксарским, Куйбышевским и Волгоградским). Анализ основан на данных, полученных в одни и те же периоды, с последующим отслеживанием перемещения аэрозоля в направлении волжских водохранилищ. В ходе работы выявлены дни с присутствием в атмосфере пылевого аэрозоля. Проведено сравнение периодов, в которые были получены высокие значения аэрозольной оптической толщины и низкие – параметра Ангстрема над Черным морем и Волгой. Выявлены периоды, когда данные аномалии наблюдались синхронно в обоих регионах. Ключевой результат данного исследования состоит в том, что оптические характеристики аэрозоля над Черным морем и Куйбышевским водохранилищем в период интенсивного пылевого переноса со стороны пустыни Сахары не претерпели значимых изменений. Это свидетельствует о возможности применения региональных алгоритмов, разработанных для Черного моря, при восстановлении коэффициентов яркости по спутниковым данным над водоемами р. Волги в условиях присутствия в атмосфере пылевого аэрозоля. Представленные результаты формируют предварительное описание оптических характеристик атмосферы в исследуемых регионах и могут быть использованы для оценки точности стандартных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных.

Ключевые слова: *SPM*, *MODIS*, *VIIRS*, *SILAM*, обратные траектории *HYSPLIT*, параметр Ангстрема, пылевой аэрозоль, дымовой аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, АОТ, Волга, Черное море, атмосферный аэрозоль

© Калинская Д. В., Мольков А. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0
International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена за счет гранта РНФ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. Авторы выражают признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений. Также авторы благодарят *Air Resources Laboratory's (ARL)* и разработчиков *HYSPLIT* за своевременное предоставление качественных данных моделирования. Авторы выражают благодарность И. А. Капустину и Г. В. Лещеву за участие в выполнении натурных измерений. Исследования над Черным морем выполнены в рамках темы государственного задания Морского гидрофизического института РАН FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений («Оперативная океанология»)».

Для цитирования: Калинская Д. В., Мольков А. А. Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Средней и Нижней Волги за 2022–2024 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 141–162. EDN AIMHIF.

Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol over the Black Sea and Reservoirs of the Middle and Lower Volga for 2022–2024

D. V. Kalinskaya^{1, 2 *}, A. A. Molkov^{1, 3}

¹ Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

³ A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia

* e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of a comprehensive analysis of atmospheric aerosol based on *in situ* photometer SPM measurements data, MODIS (Aqua/Terra) and VIIRS satellite data, and HYSPLIT air flow modeling data. The study was conducted by comparing the optical characteristics obtained during the same periods over the Black Sea region and tracking the movement of aerosol towards reservoirs located in different parts of the Volga River: the Middle Volga (Gorky and Cheboksary Reservoirs) and the Lower Volga (Kuybyshev and Volgograd Reservoirs). The analysis revealed the days of dust aerosol presence in the atmosphere. We compared the periods when high values of the aerosol optical depth (AOD) and low values of the Angstrom exponent were obtained for the Black Sea and for the Volga River. The periods when high values of AOD and low values of the Angstrom exponent were obtained simultaneously for the Black Sea and for the Volga River region were identified. A key finding of this study is the stability of the aerosol optical characteristics over the Black Sea and the Kuybyshev Reservoir, which persisted even during intensive dust transport from the Sahara Desert. This proves that regional algorithms for the Black Sea can be used to restore the brightness coefficients from satellite data when there is dust aerosol in the atmosphere over the Volga River reservoirs. The presented results provide a preliminary description of the atmosphere optical characteristics in the study regions and may be useful for testing the accuracy of standard atmospheric correction algorithms for satellite data.

Keywords: SPM, MODIS, VIIRS, SILAM, backward trajectories of HYSPLIT, Angstrom exponent, dust aerosol, smoke aerosol, aerosol optical depth, AOD, Volga, Black Sea, atmospheric aerosol

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of the RNF grant No. 23-17-00071 (“Volga bio-optical algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. The authors express their gratitude to S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the SPM photometer and its software and for the possibility of using high-quality photometric measurement data. The authors also thank Air Resources Laboratory (ARL) and the developers of HYSPLIT for providing high-quality simulation data in a timely manner. The authors express their gratitude to Kapustin I.A. and Leshchev G.V. for their participation in performing field measurements. For the Black Sea the researches were performed under state assignment of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine waters based on mathematical modeling using data from remote and contact measurement methods” (“Operational Oceanology”).

For citation: Kalinskaya, D.V. and Molkov, A.A., 2025. Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol over Reservoirs of the Middle and Lower Volga in Comparison with the Black Sea for the Period 2022–2024. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 141–162.

Введение

Актуальной задачей спутниковой океанологии является получение достоверной информации о состоянии вод различных водоемов и исследование трендов изменения качества их вод, а также оценка влияния антропогенных и биогенных факторов на акватории. Различные природные явления, такие как лесные пожары, пылевые бури, извержения вулканов, а также разнообразные технологические процессы приводят к увеличению количества вредных веществ, поступающих в атмосферу и гидросферу [1–3]. При сжигании твердого топлива в составе уходящих дымовых газов в окружающую среду выбрасываются загрязняющие ядовитые химические вещества. Самыми распространеными из них являются оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды и пыль [4–6].

Возрастающее загрязнение воздушных бассейнов в ряде городов подтверждает, что современное промышленное производство значительно влияет на природную среду, изменяя существующий баланс и круговорот веществ и энергии, поэтому все более важное значение приобретают долгосрочные программы по поддержанию нормального функционирования природных экологических систем [2–6].

Объектами исследования являются Черное море (западное и крымское побережья, где расположены станции *AERONET* (*Aerosol RObotics NETwork*) *Galata_Platform* (43.0° с. ш., 28.2° в. д.) и Севастополь (44.58° с. ш., 33.43° в. д.)) и водохранилища р. Волги. Над Черным морем первые измерения характеристик атмосферы были выполнены еще 1910 г., а системные фотометрические наблюдения в рамках международной программы *AERONET* ведутся с 2006 г. В 2015 г. был запущен второй этап фотометрических измерений с использованием отечественного фотометра *SPM* (*Sun Photometer Mobile*) – аналога приборов в сети *AERONET*.

В отличие от Черного моря, комплексные исследования Волги как единой экологической системы до сих пор не проводились. Для эффективного мониторинга реки необходим анализ всей водной системы, включая три взаимосвязанных компонента: атмосферу, водную среду и гидробионты. Эколого-токсикологическое состояние водоема определяется такими взаимно обусловленными процессами, как водообмен с атмосферой, перенос токсичных веществ по воздуху и поступление загрязнений в воду [7]. Таким образом, сопоставление данных для этих двух регионов позволяет выявить как общие закономерности переноса и трансформации аэрозолей, так и специфические для каждого из них процессы.

В 1995–2003 гг. в бассейне р. Волги был получен большой массив данных о газовых выбросах в атмосферу. Анализ этих данных выявил тенденцию к улучшению состояния атмосферы: суммарная масса газовых выбросов в атмосферу над Волжским бассейном сократилась на 2.0 млн т: с 9.1 млн т за 1995 г. до 7.1 млн т за 2003 г. В 2017–2019 гг. в рамках федерального проекта «Оздоровление Волги» была разработана концепция снижения диффузного загрязнения р. Волги [8], основанная на анализе гидрологических данных о загрязняющих веществах и параметрах атмосферы.

Тем не менее существующих данных недостаточно для решения важной прикладной задачи – использования оптической спутниковой информации для оценки качества вод Волги. Кроме того, остается малоизученной роль дальнего интенсивного переноса аэрозоля, в частности влияние интенсивного переноса воздушных масс из региона Черного моря на атмосферные характеристики над бассейном Волги. Для решения этих задач требуется комплексный анализ, объединяющий данные о состоянии атмосферы и водной среды.

В связи с этим в данной работе особое внимание уделено сопоставлению оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем и водохранилищами Волги, что позволяет выявить общие закономерности переноса и трансформации аэрозольных частиц в обоих регионах.

Для анализа использовались данные натурных измерений, спутниковые данные *MODIS* (*Aqua/Terra*), *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (*VIIRS*) и результаты моделирования переноса воздушных масс по модели *HYSPLIT* для четырех водохранилищ, расположенных в разных частях реки: Средней (Горьковское и Чебоксарское водохранилища) и Нижней Волги (Куйбышевское и Волгоградское водохранилища) (рис. 1) – в сопоставлении с аналогичными данными, полученными над Черным морем.

Для каждого из исследуемых регионов определялись фоновые характеристики атмосферного аэрозоля, служащие точкой отсчета для оценки последствий аэрозольного воздействия. Под фоновыми характеристиками в работе понимаются средние значения оптических параметров, рассчитанные с исключением выбросов. Фоновый аэрозоль исследуемых регионах состоит преимущественно из субмикронных фракций минеральной пыли и других аэрозолей (главным образом сульфатных) континентального происхождения, проникших через облачный фильтр в верхнюю тропосферу на высоте 2–3 км над океанами и 5 км над континентами и распределенных там сравнительно равномерно с концентрацией числа частиц $\sim 300 \text{ см}^{-3}$ при стандартных температуре и давлении [9].

Фоновые характеристики атмосферного аэрозоля: аэрозольная оптическая толщина (АОТ) на длине волны 500 нм (АОТ(500)) и параметр Ангстрема (α) – в различных регионах представлены для сравнения в табл. 1. Например, для Северного Тянь-Шаня, региона, подверженного воздействию пылевого аэрозоля, в период переноса в регион этого аэrozоля АОТ(500) = 0.74 ± 0.14 , что превышает фоновые значения (табл. 1) более чем в три раза [10]. В Байкальском регионе, на который основное воздействие оказывают сезонные пожары, в условиях присутствия дыма в атмосфере значения АОТ превышают фоновые в шесть – восемь раз в большей части спектра [11]. Фоновые значения для Среднего Урала – региона, подверженного и пылевым выносам, и переносам дыма от пожаров, – представлены по результатам измерений оптических характеристик, проведенных в Коуровской астрономической обсерватории (Свердловская область) и в Екатеринбурге [12]. Фоновые значения атмосферного аэrozоля для центральной части России можно оценить по изменчивости оптических характеристик, полученных в Москве и Подмосковье. Так, фоновые значения для этого региона, по данным Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. Обухова РАН, приведены в [13]. Для региона Сибири фоновые значения атмосферного аэrozоля были получены по фотометрическим измерениям на станции «Фоновая», Томская область. В период интенсивных пожаров для данного региона показатель АОТ(500) составляет 0.95 ± 0.86 , что примерно в шесть раз превышает фоновые значения и в 2.5 раза – значения, характерные для обычного дымового аэrozоля [14]. Установление фоновых уровней позволяет перейти к идентификации аномалий, вызванных дальним переносом аэrozоля.

Таблица 1. Фоновые оптические характеристики атмосферного аэrozоля, полученные над различными регионами

Table 1. Background optical characteristics of atmosphere aerosol obtained over various regions

Регион/город / Region/city	Фоновые АОТ(500) / Background AOD(500)	Параметр Ангстрема α / Angstrom exponent α
Северный Тянь-Шань / Northern Tian Shan	0.24 ± 0.09	–
Байкальский регион / Baikal region	< 0.1	–
Свердловская область / Sverdlovsk Oblast	0.135 ± 0.128	–
г. Екатеринбург / Ekaterinburg	0.168 ± 0.126	1.239 ± 0.3
г. Звенигород / Zvenigorod	0.17 ± 0.06	1.46 ± 0.4
Томская область / Tomsk Oblast	0.16 ± 0.08	1.4 ± 0.4

В частности, для анализа были отобраны периоды, когда значения аэрозольной оптической толщины (АОТ) и параметра Ангстрема существенно отклонялись от фоновых уровней. Это дало возможность выделить эпизоды интенсивного переноса воздушных масс из региона Черного моря в направлении бассейна Волги и количественно оценить их влияние на оптические свойства атмосферы над водохранилищами.

Для верификации спутниковых данных и результатов моделирования использовались наземные фотометрические измерения. Наземная солнечная фотометрия является одним из основных методов дистанционного зондирования для определения состава газов и аэрозолей атмосферы наряду со спутниковым дистанционным зондированием. Преимуществом спутниковых систем является широкий охват территории, позволяющий описывать пространственное распределение оптических характеристик атмосферы (например, радиометры *MODIS* на спутниках *Terra* и *Aqua*). Однако неопределенность отражательной способности подстилающей поверхности существенно ограничивает точность определения АОТ, позволяя получать достоверные данные в узком спектральном диапазоне. Это создает серьезные трудности при определении состава аэрозольных частиц. Развитие методов дистанционного зондирования способствовало появлению новых эффективных технологий и систем – судовых и спутниковых – оперативного мониторинга качества вод таких эвтрофных водоемов, как Горьковское, Куйбышевское и Волгоградское водохранилища. Ввиду указанных ограничений дистанционных методов, натурные исследования аэрозолей с использованием фотометров остаются актуальной задачей.

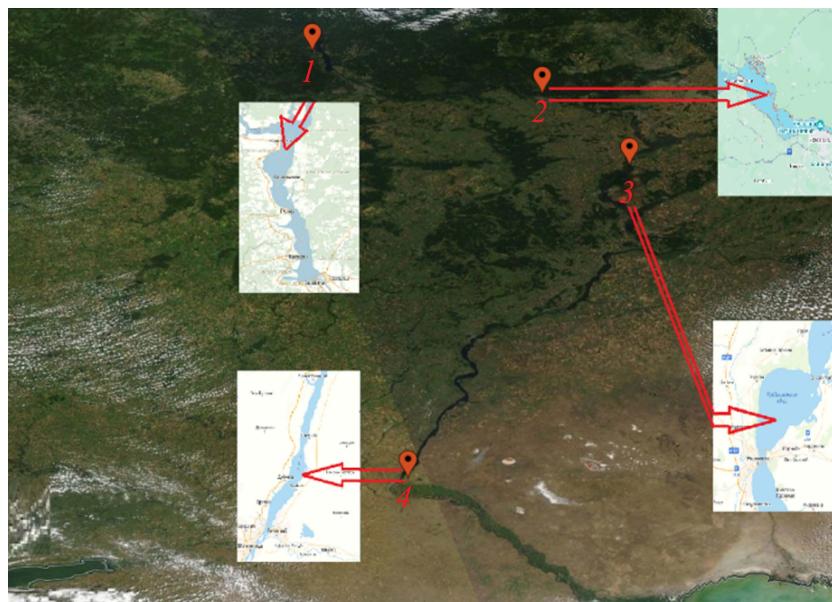


Рис. 1. Расположение географических объектов исследования по р. Волге. Цифрами обозначены водохранилища: 1 – Горьковское; 2 – Чебоксарское; 3 – Куйбышевское; 4 – Волгоградское (снимок *VIIRS*)

Fig. 1. Location of the study geographical objects on the Volga River. The numbers denote reservoirs: 1 – Gorky Reservoir; 2 – Cheboksary Reservoir; 3 – Kuybyshev Reservoir; 4 – Volgograd Reservoir (Satellite *VIIRS*)

Также остаются малоисследованными факторы, влияющие на состав аэрозолей, например метеорологические условия.

Цель работы – комплексный анализ оптических характеристик атмосферного аэрозоля над акваторией Черного моря и четырьмя водохранилищами бассейна р. Волги (Горьковским и Чебоксарским (Средняя Волга), Куйбышевским и Волгоградским (Нижняя Волга)) в 2022–2024 гг. на основе интеграции данных натурных измерений, спутниковых наблюдений (*MODIS/Aqua-Terra*, *VIIRS*) и моделирования траекторий переноса воздушных масс с использованием модели *HYSPLIT*. В задачи исследования входит сопоставление пространственно-временной изменчивости аэрозольных параметров над указанными регионами, отслеживание переноса аэрозольных масс от Черного моря в направлении волжских водохранилищ и анализ особенностей их распространения над акваториями водоемов.

Приборы и материалы

Для определения АОТ использовались данные натурных измерений солнечными фотометрами двух типов: эталонного прибора сети *AERONET – Cimel* [15] и *SPM* (Sun Photometer Mobile), его отечественного аналога [16]. Оба прибора работают в диапазоне длин волн 340–2134 нм. При соблюдении условий эксплуатации и калибровки погрешность определения АОТ составляет 0.01–0.02, а влагосодержания атмосферы – около 0.1 г/см². Подробное описание методик калибровки и расчета искомых характеристик приведено в работах [16–18].

Спутниковые данные об АОТ и параметре Ангстрема получены с помощью алгоритма *MAIAC* (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) по данным *MODIS/Terra* и *MODIS/Aqua* [19, 20]. Алгоритм обеспечивает пространственное разрешение 1 км, что позволяющих отслеживать городские загрязнения мелкого масштаба, дым от пожаров (включая небольшие локальные очаги) и пыльные бури. Выбор данного продукта обусловлен его доступностью, высоким разрешением и возможностью мониторинга динамики аэрозолей в режиме, близком к реальному времени.

Для анализа источников аэрозольного переноса в регионе Черного моря, Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ использовали результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков с помощью программного комплекса *HYSPLIT*¹⁾ (интегрированная гибридная лагранжевая траекторная модель для одной частицы, разработанная Лабораторией воздушных ресурсов (англ. *Air Resources Laboratory*, сокращ. *ARL*)). На основании полученных результатов моделирования установлено преобладание западного переноса воздушных масс в исследуемый регион¹⁾. В этой работе впервые для Черного моря представлены результаты анализа не только обратных, но и прямых траекторий перемещения воздушных потоков. Это позволило сопоставить оптические характеристики с временным сдвигом перемещения аэрозоля над Черным морем и спустя несколько дней над водоемами.

Набор радиометров *VIIRS* предоставляет пользователям аэрозольные продукты *Deep Blue NASA Standard Level-2 (L2)* спутниковой системы *JPSS* (*Joint Polar Satellite System*). С 17 февраля 2018 г. для получения значений АОТ

¹⁾ URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 25.08.2025).

используется алгоритм *VIIRS Deep Blue Aerosol (DBA)* [21, 22]. Алгоритм *Deep Blue* применяется для анализа данных, полученных над сушей, а алгоритм *Satellite Ocean Aerosol Retrieval (SOAR)* – над водными акваториями. Данные, полученные в определенных диапазонах работы *VIIRS* и обработанные с помощью двух вышеописанных алгоритмов, позволяют в итоге получить эталонные значения *AOT L2 Deep Blue* на длине волны 550 нм для исследуемого региона [22, 23].

Алгоритм *DBA (Dark Target/Bright Target Algorithm)* был применен к данным *VIIRS* для создания долгосрочного климатического ряда данных об атмосферных аэрозолях. Алгоритм *DBA* изначально был разработан для поиска аэрозолей над яркими поверхностями. Для достижения этой цели была создана глобальная база данных коэффициентов отражения поверхности с разрешением 0.1° в видимом диапазоне спектра с использованием метода, описанного в [24]. Тип аэрозоля и АОТ определяются одновременно с использованием таблиц *look-up tables* на основе спутниковых наблюдений. Данные *MODIS Collection 6 (C6)* проходят повторную обработку по алгоритму, использующему три разных подхода к определению коэффициентов отражения поверхности в разных типах местности (засушливые/полузасушливые регионы, территории с растительным покровом, городские/застроенные зоны и переходные области). Для идентификации дымовых аэрозолей применяется метод спектральной кривизны, основанный на использовании соотношения коэффициентов отражения поверхности на длинах волн 412/488 и 488/670 нм. В дополнение к данным *VIIRS* также применяются новые модели несферических пылевых частиц, повышающие точность определения АОТ. В 2020 г. в систему обработки данных были интегрированы новейшие аэрозольные продукты *I011 DB L2*. Методика позволяет расширить диапазон детектируемых поверхностей – от максимально ярких до очень темных [24, 25], значительно улучшая возможности мониторинга аэрозолей.

Одна из задач алгоритмов *DBA* и *SOAR* – определение типов атмосферного аэрозоля в дневное время в отсутствие облаков и снега. Над сушей тип аэрозоля классифицируется на основе значений АОТ, параметра Ангстрема (α), эквивалентной отражательной способности Ламберта (*LER*) и яркостной температуры. Комбинированный тип аэрозоля над сушей и океаном определяется на основе пикселей, прошедших проверку на качество [21, 22, 24].

Для определения преимущественного типа аэрозоля проведен анализ спутниковых данных *CALIPSO*. Основной целью *CALIPSO* являются глобальные измерения характеристик аэрозолей и облаков. Алгоритм *CALIPSO* по измеренному коэффициенту деполяризации (δv) классифицирует аэрозоль по типам: $\delta v \in [0.025–0.05]$ – чистый морской аэрозоль, $\delta v \in [0.05–0.15]$ – частицы загрязненной пыли или смога, $\delta v \in [0.15–0.5]$ – с большой вероятностью пылевой аэрозоль. Пространственное разрешение для большинства типов аэрозолей составляет 80 км, за исключением чистого морского и загрязненного континентального аэрозолей. Около 80 % смога и 60 % загрязненного пылевого аэрозоля обнаруживаются над водной поверхностью. Чистая пыль распределена примерно равномерно и над сушей, и над водной поверхностью [25, 26].

Измерения оптических характеристик атмосферы над Черным морем и Волгой проводили с борта маломерных судов или с берега. Периоды проведения измерений атмосферного аэрозоля над водохранилищами р. Волги приведены в табл. 2. Измерения над Черным морем проводились синхронно.

Таблица 2. Качественные и количественные данные об измерениях основных оптических характеристик атмосферы над водохранилищами р. Волги

Table 2. Qualitative and quantitative data on measurements of main atmosphere optical characteristics over reservoirs of the Volga River

Водохранилище / Reservoir	Период / Period	Количество измерений / Number of measurements
Горьковское / Gorky Reservoir	Весна – лето 2022–2024 гг. / Spring–summer 2022–2024	292
Чебоксарское / Cheboksary Reservoir	09.09.2023–10.09.2023; 16.09.2023–17.09.2023	18
Куйбышевское / Kuybyshev Reservoir	17.07.2023–28.07.2023; 09.09.2023–16.09.2023	58
Волгоградское / Volgograd Reservoir	28.05.2024–07.06.2024	13

Как видно из данных табл. 2, для Горьковского водохранилища приведены не периоды, а сезоны измерений. Это объясняется тем, что экспедиции в регионе данного водохранилища имели постоянный характер, однако измерения осуществлялись в течение как одного дня, так и недели или более.

В ходе экспедиций по исследованию оптических свойств атмосферы над регионом Средней и Нижней Волги были получены данные об изменчивости АОТ на всем диапазоне работы фотометра *SPM*, а именно на 11 длинах волн: 340, 379, 441, 501, 548, 675, 872, 940, 1244, 1020 и 1556 нм. Наиболее интересны для исследования каналы, близкие к спутниковым: сравнительный анализ дистанционных и натуральных данных позволяет решать многие задачи как оптики, так и гидрофизики в целом. Для центральной части России высокими значениями АОТ на длине волны 500 нм считаются значения выше 0.3. Именно для дат с такими значениями в данной работе определен тип аэрозоля и регион, который являлся источником аэрозольной активности.

Результаты и обсуждение

Как было указано ранее, с 2015 г. начался период мониторинга оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем фотометром *SPM*. Это позволило приступить к новому этапу сравнительных исследований различных регионов, оснащенных аналогичными приборами. Ближайшим водным объектом, где проводятся фотометрические измерения, является бассейн р. Волги. В работе приводятся результаты сравнительного анализа оптических характеристик атмосферного аэрозоля, которые были получены над Черным морем (над западной и крымской прибрежной зоной), и данных регулярных измерений над Горьковским, Чебоксарским, Куйбышевским и Волгоградским водохранилищами и Нижегородской областью с апреля 2022 г. по июль 2024 г. Для этого периода была исследована также активность переносов аэрозолей пыли и дыма от лесных пожаров.

Анализ сезонного хода АОТ для многих центральных и южных регионов России выявил основной весенний максимум АОТ и вторичный летний максимум, который более выражен во время интенсивных лесных пожаров.

Как известно, в летний период как в Черноморском регионе, так и в Нижегородской области регистрируется большое количество лесных пожаров, что может вызывать помутнение атмосферы и, соответственно, приводит к повышению значений основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля в этот период [25]. Известно, что пылевой и дымовой аэрозоли характеризуются высокими (более чем в два раза выше среднемесячных) значениями АОТ [1–3]. На рис. 2 показаны среднедневные значения АОТ(500) за период синхронных исследований атмосферы над Черным морем (побережье Крыма (рис. 2, *a*) и западный берег Черного моря (рис. 2, *b*)) и бассейном р. Волги (рис. 2, *c*). Как видно, над Волгой высокие значения АОТ(500) были зарегистрированы в апреле, июле и августе 2022 г., а также в апреле 2023 г. Для определения основного источника поступления аэрозолей, оказывающего наибольшее влияние на определяемые дистанционными методами свойства подстилающей поверхности, необходимо проанализировать сезонную и суточную изменчивость аэрозольных оптических характеристик.

Из рис. 2, *b* видно, что максимальные значения АОТ наблюдались в 2022 г. 13 апреля, 6, 7, 24–27 июля, 5–8, 24–27 августа; в 2023 г. 12, 24–28 апреля, 25–27 мая, 18, 26–28 июля; в 2024 г. 4 июня. В основном повышение значений АОТ носит не однодневный (кратковременный), а периодический характер, что может быть следствием как интенсивного пылевого переноса, так и масштабного лесного пожара, который в этом случае является источником аэрозоля горящей биомассы (аэрозоля дыма). Исключением являются незначительные повышения АОТ летом 2024 г., однако стоит учесть, что в 2024 г. измерения были начаты только в конце мая.

Горьковское водохранилище

С 2022 г. фотометром *SPM* в исследуемом регионе ведется постоянный мониторинг оптических характеристик, благодаря чему были получены фоновые характеристики атмосферного аэрозоля над Горьковским водохранилищем и Нижним Новгородом. В исследованиях 2016–2017 г. фоновыми значениями считались АОТ(500) ≈ 0.18 и $\alpha \approx 1.45$, однако более поздние регулярные измерения, охватывающие не только летний период, показали, что фоновые значения в исследуемом регионе ниже: АОТ(500) = 0.12 и $\alpha = 1.22$ [26]. Анализ распределения частиц по размерам не показал для фоновых аэрозолей преобладания частиц определенного размера (крупных или мелких).

Для выявления источников аэрозольной активности были проанализированы спутниковые данные за все дни, в которые регистрировались повышенные значения оптических характеристик атмосферного аэрозоля, полученные в ходе натурных измерений.

Как видно из рис. 2, среднедневное значение АОТ(500), равное 0.28, зафиксированное 13.04.2022, является максимальным за весь весенний период 2022 г. Результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков за этот день с использованием модели *HYSPLIT*, показали перемещение пылевого аэрозоля на высоте 3 км со стороны Кара-Кум. Это означает, что увеличение АОТ 13.04.2022 обусловлено присутствием пылевого аэрозоля в атмосфере над исследуемым регионом.

В летний период 2022 г. отмечено большое количество дней с высокими (превышающими среднегодовые значения более чем в два раза) значениями

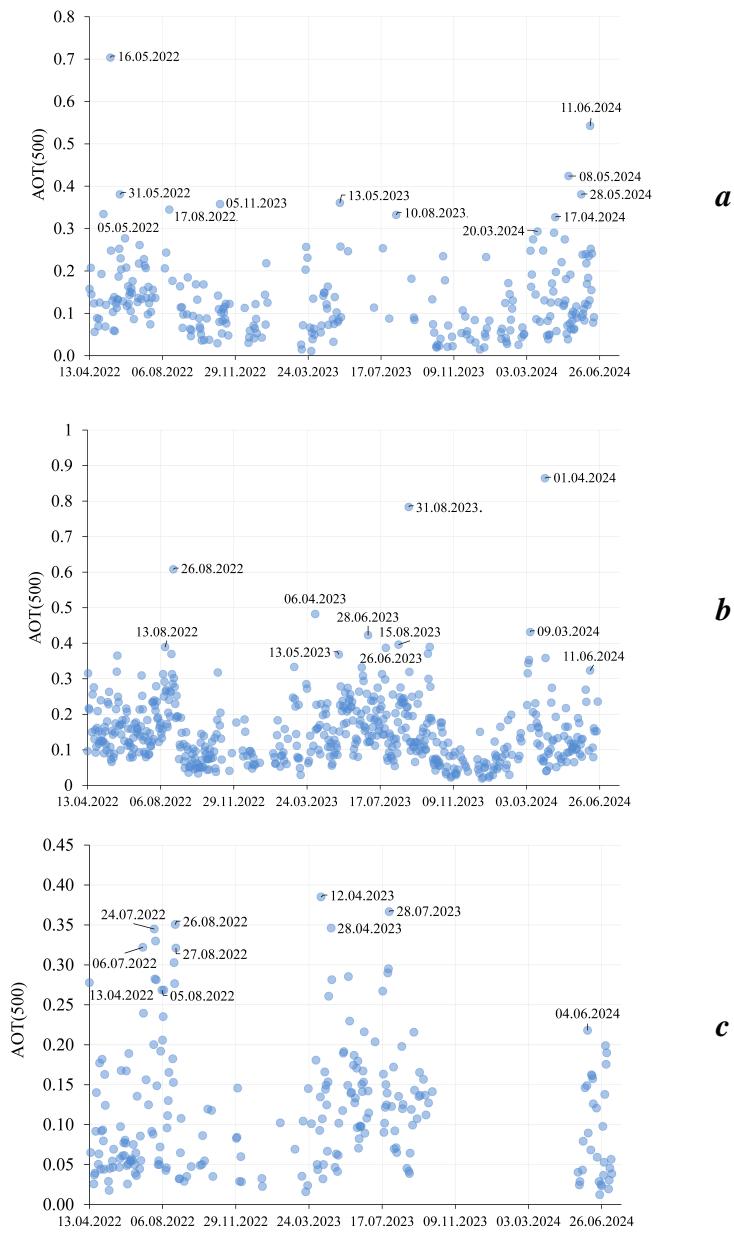


Рис. 2. Межгодовая изменчивость АОТ на длине волны 500 нм: над Черным морем (зона ЮБК и Керченский пролив), по данным станции AERONET, период измерений 288 дней (*a*); над Черным морем, по данным станции Section_7 (Румыния), период измерений 568 дней (*b*); над Волгой, по данным станций, период измерений 224 дня (*c*)

Fig. 2. Average variability of aerosol optical depth (AOD) at a wavelength of 500 nm: over the Black Sea, the South Coast of Crimea zone and the Kerch Strait, from AERONET station data (288 days) (*a*); over the Black Sea, from Section_7 station (Romania) (568 days) (*b*); over the Volga River, from stations data (224 days)

АОТ на всем спектральном диапазоне. Анализ спутниковых данных и результатов моделирования обратных траекторий показал, что повышение значений АОТ обусловлено в большинстве случаев присутствием в атмосфере аэрозоля дыма от лесных пожаров, локализованных к востоку от Горьковского водохранилища. Среднедневное значение АОТ(500) = 0.39 за 12.04.2023 является максимальным за весь исследуемый период измерений. Максимальное значение АОТ (АОТ(500) = 0.45) в этот день было зарегистрировано в 14:00. По спутниковым данным, над Горьковским водохранилищем значения АОТ *MAIAC* находились в пределах (0.4 ± 0.01). Моделирование обратных траекторий перемещения воздушных потоков было выполнено с помощью программного комплекса *HYSPLIT*, при этом временем начала моделирования было выбрано 14:00 UTC – момент регистрации максимальных значений АОТ. Область переноса совпадала с областью, в которой по алгоритмам *AIRS MODIS/Aqua* была определена повышенная концентрация пылевых аэрозолей.

Анализ вклада крупно- и мелкодисперсных аэрозольных частиц в общую величину АОТ(500) показал, что повышенные значения АОТ в основном обусловлены присутствием мелкодисперсных частиц, доля которых достигала 80 %. Спутниковые данные *MAIAC* подтверждают превышение значений АОТ над фоновым уровнем, что хорошо согласуется с результатами натурных измерений.

Определение типа аэрозоля по алгоритму *VIIRS Deep Blue* за 24.04.2023

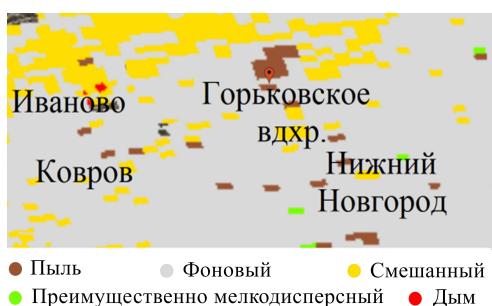


Рис. 3. Спутниковые изображения, полученные посредством спектрорадиометра *VIIRS* (время пролета 10:33 UTC) по алгоритму *VIIRS Deep Blue* за 24.04.2023 (архив AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20 doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002 (дата обращения: 20.01.2024))

Fig. 3. Satellite images obtained by the *VIIRS* spectroradiometer (flight time 10:33 UTC) using the *VIIRS Deep Blue* algorithm for 24 April 2023 (Archive AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20 doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002 (date of access: 20 January 2024))

выявило присутствие частиц пыли, а также смешанного и фонового аэрозоля (рис. 3). Высокие значения параметра Ангстрема за 24–28 апреля 2023 г. ($\alpha > 2$) подтверждают, что повышенные значения АОТ обусловлены присутствием мелкодисперсного поглощающего аэрозоля в высокой концентрации.

Высокие значения АОТ были зафиксированы также в конце апреля и конце июля 2023 г. Анализ модельных и спутниковых данных с целью определения источника аэрозольной активности, который повлиял на изменчивость значений АОТ в конце апреля 2023 г., не выявил ни признаков переноса пыли, ни интенсивных пожаров, дым от которых мог бы переместиться в атмосферу исследуемого региона.

Значения АОТ(500) = 0.29 при $\alpha = 0.7$ были получены 25.05.2023. При определении преимущественного типа аэрозоля по алгоритму *VIIRS Deep Blue* выявлено наличие смешанного и мелкодисперсного аэрозоля

в этот день. Статистический анализ выявил, что значения АОТ, превышающие среднемесячные, отмечались в 26 из 226 дней наблюдений. В основном повышенные значения АОТ наблюдались в дни, когда в атмосфере над исследуемым регионом находился дымовой и пылевой аэрозоль, однако они фиксировались и в дни регистрации случаев выноса антропогенного аэрозоля. В ряде случаев источник аэрозольной активности не был определен.

Поскольку за весь исследуемый период перенос со стороны Африки через Черное море не был зарегистрирован, сопоставление оптических характеристик, полученных для данного водохранилища, с характеристиками для черноморских станций не проводилось.

Чебоксарское водохранилище

Временной период экспедиции по Чебоксарскому водохранилищу был наименьшим (четыре дня). За эти дни были получены значения АОТ(500), близкие к фоновым для Нижегородского региона (среднее АОТ(500) = 0.11).

Среднее значение параметра Ангстрема $\alpha = 1.7$ указывает на преобладание мелкодисперсных частиц в течение исследуемого периода, что подтверждается данными о распределении частиц по размерам: вклад крупнодисперсной моды составляет только 21 % от общего значения АОТ(500).

Анализ данных оптических характеристик за периоды 9–10 и 16–17 сентября 2023 г. для черноморских станций подтвердил наличие мелкодисперсного и фонового аэрозоля над всей акваторией Черного моря (средние значения АОТ(500) для обеих станций не превышали 0.12).

Куйбышевское водохранилище

В этом районе 26–28 июля 2023 г. были получены высокие (в два раза выше фоновых) значения АОТ(500). За весь период экспедиций максимальные значения АОТ над Куйбышевским водохранилищем были зарегистрированы 28 июля 2023 г. (среднедневное значение АОТ(500) = 0.38, а в 10:00 АОТ(500) = 0.43, что превышает фоновые значения для центральной части России в два раза). В этот же день значения параметра Ангстрема были ниже 1.0 (рис. 4). Анализ распределения частиц по размерам показал, что вклад крупных частиц составляет 45 %. Такой набор оптических характеристик обычно получают при регистрации аридного аэрозоля над исследуемым регионом.

Сравнительный анализ оптических характеристик за один и тот же период над Куйбышевским водохранилищем и Черным морем показал, что за два дня до регистрации максимальных значений над Волгой были получены высокие значения АОТ и низкие значения параметра Ангстрема на черноморских станциях *AERONET Galata_Platform* ($\text{АОТ}(510) = 0.4$ и $\alpha = 0.7$) и Севастополь ($\text{АОТ}(510) = 0.39$ и $\alpha = 0.8$). Переносы пылевого аэрозоля со стороны Африки в направлении Крыма, а также центральной части России могут длиться как один день, так и более недели. Это означает, что аэрозоль, зарегистрированный 28 июля 2023 г. над Куйбышевским водохранилищем, 26 июля мог находиться в атмосфере Черного моря. Данное предположение могут подтвердить результаты моделирования обратных и прямых траекторий воздушных потоков *HYSPLIT*. Над Черным морем максимальные дневные значения АОТ и минимальные – параметра Ангстрема были зафиксированы в 14:00 UTC на станции *Galata_Platform* ($\text{АОТ}(510) = 0.48$; $\alpha = 0.48$) и в 16:00 на станции Севастополь

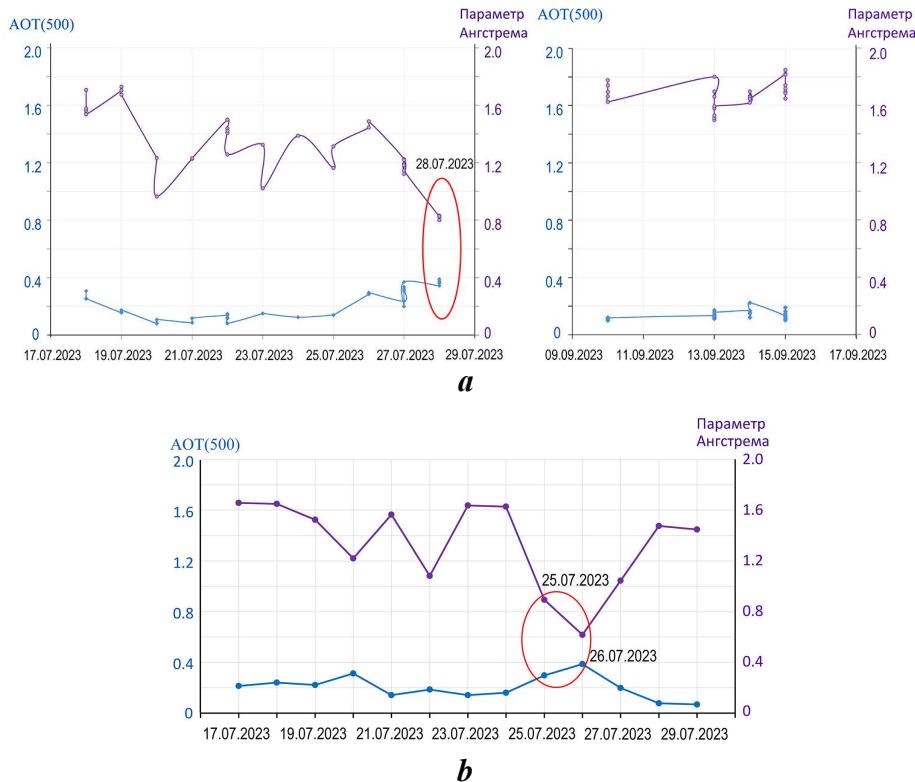


Рис. 4. Изменчивость АОТ и параметра Ангстрема над Куйбышевским водохранилищем (a) и над Черным морем (b) во время экспедиций. Красными эллипсами выделены случаи высоких значений АОТ и низких параметра Ангстрема

Fig. 4. Variability of the AOD and the Angstrom parameter during the expeditions over the Kuybyshev Reservoir (a) and over the Black Sea (b). The red ellipses denote cases of high AOD values and low Angstrom exponent values

(($AOT(500) = 0.4$; $\alpha = 0.66$). Анализ изменчивости оптических характеристик по ходу перемещения пылевого аэрозоля над черноморскими станциями и над Куйбышевским водохранилищем позволяет сделать вывод, что аэрозоль не изменился ни по составу, ни по свойствам. Значения оптических характеристик, полученные 26 июля 2023 г. над Севастополем и 28 июля над Куйбышевским водохранилищем, различаются минимально. С учетом расстояния от черноморских станций *Galata_Platform* и Севастополь до Куйбышевского водохранилища (примерно 2000 км) была определена скорость перемещения пылевого аэрозоля (~ 50 км/ч).

Поскольку наибольшие значения АОТ(500) над Куйбышевским водохранилищем были получены 28 июля 2023 г. в утренние часы, обратные траектории воздушных потоков по модели *HYSPLIT* были рассчитаны для 10:00 UTC. Анализ данных моделирования показал, что на высоте 3 км регистрируется перенос воздушной массы со стороны пустыни Сахара (рис. 5, b). Как видно, перенос со стороны Африки, по данным обратных траекторий перемещения воздушных масс, был зарегистрирован и над черноморскими станциями

AERONET (рис. 5, *a, c*), и над Куйбышевским водохранилищем (рис. 5, *e*). Результаты моделирования прямых переносов подтверждают наличие воздушной массы, которая 26 июля 2023 г. находилась над Черным морем на высоте 3 км, а 28 июля появилась над территорией Волги (рис. 5, *b, d*).

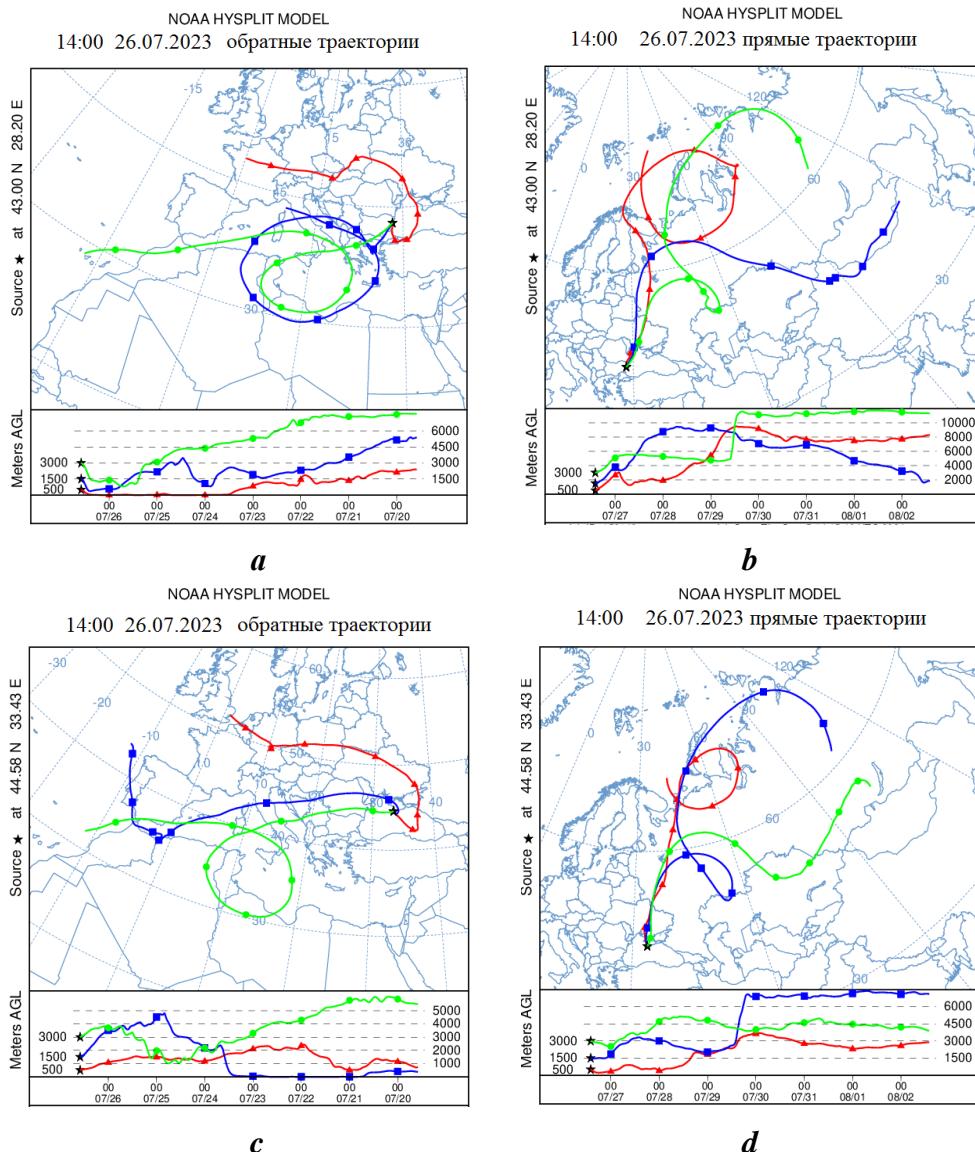
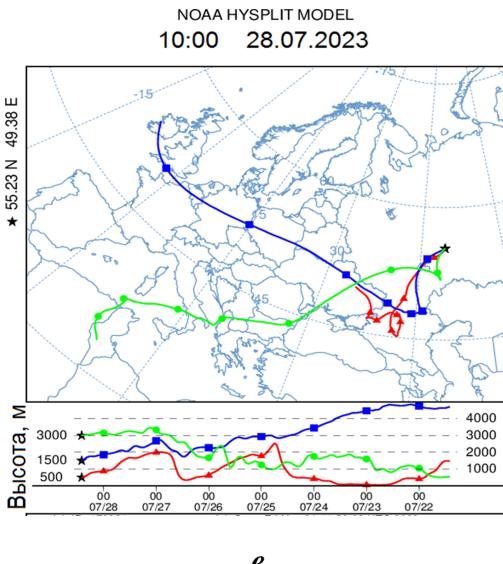


Рис. 5. Результаты моделирования перемещения воздушных потоков по модели HYSPLIT: обратные (*a*) и прямые (*b*) траектории для станции *Galata_Platform*; обратные (*c*) и прямые (*d*) траектории для станции Севастополь на 26.07.2023; обратные траектории для Куйбышевского водохранилища на 28.07.2023 (*e*)

Fig. 5. HYSPLIT air flow simulation data: backward (*a*) and forward (*b*) trajectories for Galata_Platform station; backward (*c*) and forward (*d*) trajectories for Sevastopol station for 26 July 2023; backward trajectories for Kuybyshev Reservoir for 28 July 2023 (*e*)



e

Продолжение рис. 5

Continued Fig. 5

На спутниковом снимке над центральной частью Черного моря также визуализировался шлейф дымки, которая может являться пылевым аэрозолем, переносимым со стороны Африки. Над Волгой данные спутниковых измерений АОТ отсутствуют, однако даже над прибрежной территорией значения АОТ завышены относительно фоновых и минимально отличаются от натурных данных *SPM* за этот день (по данным *MODIS*, значения АОТ(500) находятся в пределах диапазона 0.35–0.36). Для подтверждения наличия источника пылевого аэрозоля были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* (рис. 6).

Анализ данных о типах аэрозоля по спутниковому алгоритму *CALIPSO* над исследуемым водоемом показал большое количество загрязненного и чистого пылевого аэрозоля. В итоге результаты и моделирования, и дистанционного зондирования подтверждают, что завышенные значения АОТ, низкие значения параметра Ангстрема, а также высокая концентрация крупных аэрозоль-

ных частиц обусловлены присутствием в атмосфере частиц аридного происхождения. В результате анализа пространственно-временной изменчивости оптических свойств аэрозоля над Куйбышевским водохранилищем

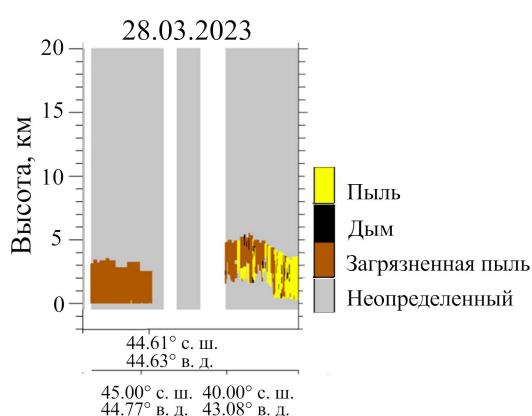


Рис. 6. Спутниковые данные *CALIPSO* за 28.07.2023

Fig. 6. CALIPSO satellite data for 28 July 2023

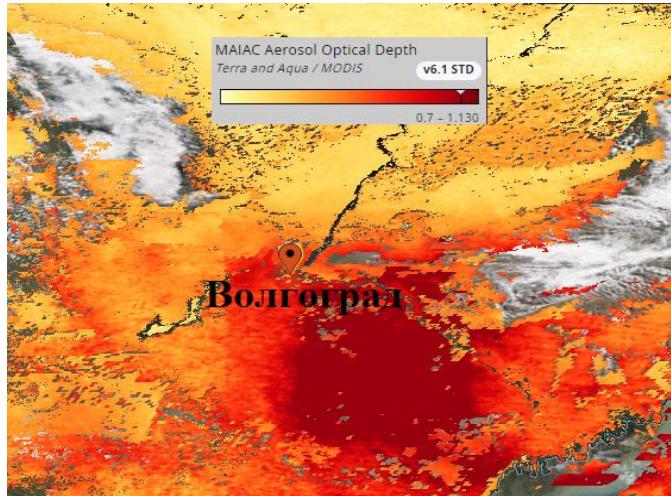
и Черным морем сделан вывод, что во время интенсивного пылевого переноса со стороны пустыни Сахары характеристики аэрозоля остаются постоянными, несмотря на разницу во времени их обнаружения над регионами. Таким образом, при обнаружении пылевого аэрозоля над водоемами р. Волги можно использовать региональные алгоритмы восстановления коэффициентов яркости воды для Черного моря.

Экспедиционные данные об этом водоеме были получены за период с 31.05.2024 по 05.06.2024. Средние значения основных оптических характеристик за исследуемый период: АОТ(500) = 0.16; α = 1. При этом 31.05.2024 α = 0.4, а значения АОТ на всем спектральном диапазоне находились на среднем уровне.

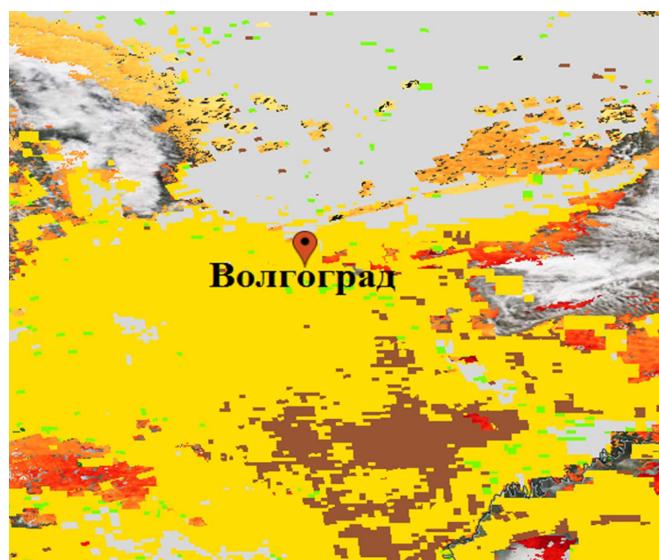
Данные спутниковых (*MODIS* и *VIIRS*) измерений АОТ за 31.05.2023 подтвердили наличие области повышенных значений юго-западнее Волгоградского водохранилища (Республика Калмыкия) (рис. 7). Анализ обратных траекторий по результатам моделирования *HYSPLIT* показал перенос пылевого аэрозоля со стороны пустыни Кара-Кум 30–31 мая 2024.

Анализ спутниковых изображений *VIIRS* и *Aqua/MODIS* (канал *True Color*) за 31.05.2024 над Волгоградским водохранилищем выявил переменную облачность во время пролета спутников в 10:02 и 10:28 UTC соответственно. Наиболее чистый снимок с минимальной облачностью получен с помощью *Terra/MODIS* (*True Color*) в 7:24 UTC. Как известно, пылевые частицы способствуют коагуляции влаги, в результате чего после прохождения пылевого аэрозоля часто формируются облака, содержащие как мелко-, так и крупнодисперсные фракции пылевого аэрозоля [27, 28]. Результаты моделирования скорости ветра с помощью программного комплекса *ICON* [29] на всех высотах до 1500 м показали перенос со стороны пустыни Кара-Кум. Наиболее интенсивный ветровой перенос был зафиксирован на высоте 500 м (рис. 8), что совпало с результатом моделирования обратных траекторий *HYSPLIT*.

Данные экспедиционных измерений за исследуемый период с 31.05.2024 по 07.06.2024, полученные над Волгоградским водохранилищем, были сопоставлены с данными одновременных наблюдений над Черным морем. Поскольку повышенные значения АОТ над Волгоградским водохранилищем, зарегистрированные 31.05.2024, обусловлены адвекцией пылевого аэрозоля из района пустыни Кара-Кум, перемещения воздушных потоков до этого события над Черным морем не рассматривались. Однако стоит отметить, что над Черным морем 4 и 5 июля 2024 г. были зафиксированы аномально высокие (более чем в полтора раза выше фоновых) значения АОТ (максимальные значения АОТ(500) = 0.3 и АОТ(500) = 0.29 соответственно). В эти даты измерения осуществлялись с помощью фотометра *SPM* с борта НИС «Профессор Водяницкий» (в ходе 131-го рейса). Совместный анализ данных натурных фотометрических измерений, спутниковых данных *VIIRS* и результатов моделирования перемещения воздушных потоков *HYSPLIT* подтвердил перенос пылевого аэрозоля в исследуемый регион (рис. 9). Хотя в весенне-летний период над Черным морем регулярно наблюдаются интенсивные переносы пылевого аэрозоля из Африки, однозначная количественная оценка их вклада в коэффициент яркости морской поверхности в мае – июне для данного региона затруднена из-за одновременного интенсивного «цветения» фитопланктона, которое также приводит к значительному росту этого параметра [30].



a



b

Рис. 7. Данные об АОТ, полученные от спутников MODIS (время пролета 10:28 UTC) и VIIRS (время пролета 10:02 UTC) за 30.05.2024: распределение АОТ по алгоритму MAIAC (*a*), определение типов аэрозоля по алгоритму VIIRS Deep Blue (*b*)

Fig. 7. Satellite data of MODIS (flight time 10:28 UTC) and VIIRS (flight time 10:02 UTC) for 30 May 2024: AOD distribution from the MAIAC algorithm (*a*), aerosol type determination from the VIIRS Deep Blue algorithm (*b*)

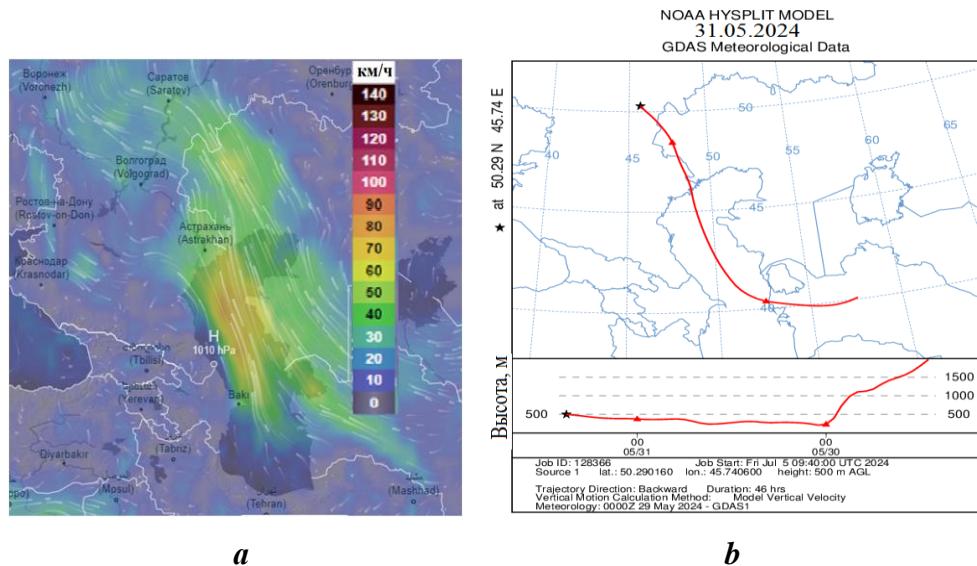


Рис. 8. Результаты моделирования скорости ветра по модели ICON (а); обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели HYSPLIT (б) на высоте 500 м
 Fig. 8. The results of modeling wind speeds according to the ICON model (a); backward trajectories of air flow movement according to the HYSPLIT model (b) at an altitude of 500 m

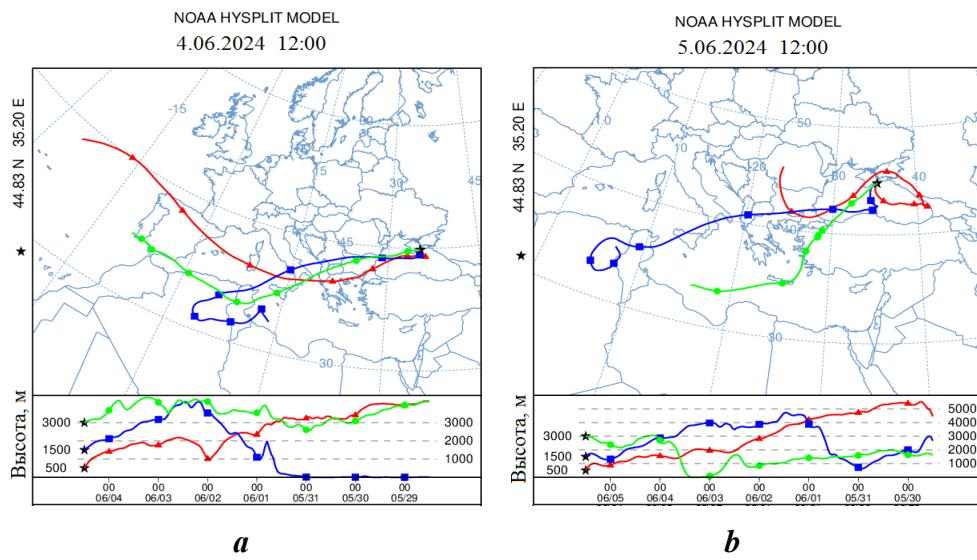


Рис. 9. Результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели HYSPLIT за экспедиционный период в Черном море на 04.06.2024 (а) и 05.06.2024 (б)
 Fig. 9. The results of backward trajectories of air flow movement modeling according to the HYSPLIT model for 4 June 2024 (a) and 5 June 2024 (b)

Заключение

В результате сравнительного анализа основных оптических характеристик атмосферы над акваторией Черного моря и над четырьмя водохранилищами р. Волги были выделены периоды с фоновыми значениями, а также эпизоды с аномально высокими значениями АОТ. Для этих периодов был проведен детальный анализ спутниковых данных и результатов моделирования перемещения воздушных потоков. В большинстве случаев повышение значений АОТ в исследуемых регионах объяснялось адвекцией пылевого аэрозоля. В результате исследования интенсивного пылевого переноса со стороны Африки были выявлены даты, когда пылевой аэрозоль переместился через Черное море в сторону Куйбышевского водохранилища. С учетом расстояния между черноморскими станциями *Galata Platform*, Севастополь и Куйбышевским водохранилищем была рассчитана средняя скорость перемещения пылевого аэрозоля (~ 50 км/ч). Выявлены весенний и летний периоды, характеризующиеся синхронным проявлением высоких значений АОТ и низких – параметра Ангстрема над Черным морем и регионом р. Волги. Важным результатом данного исследования является неизменность оптических характеристик аэрозоля над Черным морем и Куйбышевским водохранилищем во время эпизодов интенсивного пылевого переноса из пустыни Сахара. Это свидетельствует о возможности применения региональных алгоритмов, разработанных для Черного моря, для восстановления коэффициентов яркости по спутниковым данным над водоемами р. Волги в условиях присутствия пылевого аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические параметры атмосферного аэрозоля / Г. В. Розенберг [и др.]. Москва : Наука, 1980. С. 216–257.
2. Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119. EDN JWDTVР.
3. Кондратьев К. Я. Атмосферный аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 1. Свойства аэрозоля различных типов // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 1. С. 5–24. EDN OYHOHD.
4. Лисицын А. П. Аридная седиментация в мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1398–1439. EDN OJTVVF.
5. Бухарина И. Л., Журавлева А. Н., Болькова О. Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск : Удмуртский гос. ун-т, 2012. 204 с. EDN QLDGOJ.
6. Цаликов Р. Х., Акимов В. А., Козлов К. А. Оценка природной, техногенной и экологической безопасности России. Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2009. 464 с. EDN MQQNRZ.
7. Томилина И. И., Гапеева М. В., Ложкина Р. А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2018. № 82. С. 107–131. EDN LZGUJN. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>

8. Экологически безопасное, устойчивое развитие бассейна Волги: аспекты международного научного сотрудничества / Е. В. Копосов [и др.]. Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. 178 с. EDN VHGXLB.
9. Monin A. S., Shishkov Yu. A. Climate as a problem in physics // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2000. Vol. 170, iss. 4. P. 444–445. EDN MPFARZ. <https://doi.org/10.1070/PU2000v04n04ABEH000678>
10. Свердлик Л. Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля // Наука и новые технологии. 2014. № 4. С. 26–31. EDN UKJMKN.
11. Яковлева И. П., Тацкин М. А. Спектральные характеристики аэрозольной оптической толщи в условиях дымов лесных пожаров в Байкальском // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике : Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, 5–10 сентября 2022 г. Иркутск : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. С. 343–344. EDN GQRFVF.
12. Лужецкая А. П., Поддубный В. А. Особенности временной изменчивости аэрозольной оптической толщи на Среднем Урале по данным многолетних наблюдений в городском и фоновом районе // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 889–895. EDN XLVBLX. <https://doi.org/10.15372/AOO20191102>
13. Моделирование радиационного форсинга фонового аэрозоля с использованием данных измерений / И. А. Горчакова [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 4. С. 501–512. EDN KPTJFL.
14. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 / T. B. Zhuravleva [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. Vol. 10, iss. 1. P. 179–198. EDN YUZPCX. <https://doi.org/10.5194/amt-10-179-2017>
15. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B. N. Holben [et al.] // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 66, iss. 1. С. 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
16. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры / С. М. Сакерин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360. EDN OYGZCX
17. Кабанов Д. М., Сакерин С. М. Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч. 1 // Оптика атмосферы и океана. 1995. № 6. С. 852–860.
18. Информационная система для сетевых солнечных фотометров / Д. М. Кабанов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67. EDN JWJVPN.
19. Lyapustin A., Wang Y. MAIAC-multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS. 2007. 77 p.
20. Validation of VIIRS AOD through a comparison with a sun photometer and MODIS AODs over Wuhan / W. Wang [et al.] // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, iss. 5. 403. <https://doi.org/10.3390/rs9050403>
21. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring / C. Cao [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118, iss. 20. P. 11664–11678. <https://doi.org/10.1002/2013JD020418>
22. VIIRS Version 2 Deep Blue Aerosol Products / J. Lee [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2024. Vol. 129, iss. 6. e2023JD040082. <https://doi.org/10.1029/2023JD040082>

23. Aerosol properties over bright-reflecting source regions / N. C. Hsu [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42, iss. 3. P. 557–569. <https://doi.org/10.1029/2023JD040082>
24. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation / N. C. Hsu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118, iss. 16. P. 9296–9315. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50712>
25. Калинская Д. В., Папкова А. С. Корреляция данных оптических характеристик атмосферного аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO и MODIS, и фотометра SPM // Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». Санкт-Петербург, 9–11 октября 2019. Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2019. Т. 10. С. 283–287. EDN MJVWGL.
26. Kalinskaya D. V., Molkov A. A. Spatio-temporal variability of the aerosol optical depth over the Gorky and Cheboksary Reservoirs in 2022–2023 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 23. 5455. EDN IRUNGM. <https://doi.org/10.3390/rs15235455>
27. Измайлова А. В. Водные ресурсы озер России // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. EDN XEHPIR. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-4\(5-14\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-4(5-14))
28. Изменение содержания биогенных элементов в поверхностном слое морской воды после выпадения атмосферных осадков / А. В. Вареник [и др.] // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 51–52. EDN VAANPS.
29. Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin / M. Sofiev [et al.] // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8, iss. 11. P. 3497–3522. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3497-2015>
30. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 2. С. 195–203. EDN VWSEIL.

Поступила 21.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.03.2025 г.;
принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Калинская Дарья Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2622-1010, Scopus Author ID: 56380591500, kalinskaya@mhi-ras.ru**

Мольков Александр Андреевич, старший научный сотрудник, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8959-5235, Scopus Author ID: 5537777800, ResearcherID: A-3623-2014, a.molkov@inbox.ru**

Заявленный вклад авторов:

Калинская Дарья Владимировна – проведение фотометрических измерений над Черным морем, обработка данных, написание текста статьи, внесение редакционных правок

Мольков Александр Андреевич – проведение фотометрических измерений над территорией водохранилищ р. Волги

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.