

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 504.3.054

Влияние пылевого аэрозоля на интенсивность цветения цианобактерий в Каспийском море

Д.В. Калининская, А.В. Медведева, А.А. Алескерова*

*Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Поступила в редакцию 7.06.2021 г.

Проанализированы события переноса пылевого аэрозоля в акваторию и прибрежные районы Каспийского моря за период 2008–2010 гг. Показано, что такой тип аэрозоля является дополнительным источником биогенных элементов для поверхностного слоя моря. Выполнен сравнительный анализ оптических характеристик северной, средней и южной частей Каспийского моря, которые в значительной мере различаются по гидрометеорологическим условиям и, следовательно, по вкладу различных факторов, определяющих возможность аномального цветения цианобактерий. Приведены результаты исследований аномального цветения таких водорослей для региона Каспийского моря. Показано, что максимальное воздействие пылевого аэрозоля на цветение цианобактерий наблюдается в южной части исследуемого региона.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, цианобактерии, Каспийское море, MODIS, AERONET, HYSPLIT, CALIPSO; atmosphere, aerosol, cyanobacteria, Caspian Sea, MODIS, AERONET, HYSPLIT, CALIPSO.

Введение

В работах [1–3] выделяют зоны аридной седиментации, характеристики которых обусловлены особенностями климата, формированием рассеянного аэрозольного вещества на суше, его транспортировкой ветром на разных высотах 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, в основном микро- и наноразмеров (94% по массе мельче 2 мкм) [2]. В результате обобщения обширного накопленного материала по рассеянному аэрозольному осадочному веществу в атмосфере и его потокам было выделено 4 главных источника аэрозольного вещества на суше (морской аэрозоль, дым, пыль и загрязненная пыль, которая может содержать в себе смесь пылевого аэрозоля с другими тремя источниками). Они определяются географическими областями захвата аэрозоля, последующего его переноса и отложения в океане. Один из таких источников – Северная Африка (пустыня Сахара и полупустынный район Сахель). Аэрозоль из этого источника переносится в основном на север (Средиземное и Черное моря, Европа), а также в северо-западном направлении (Атлантический океан). Восточно-азиатские источники пылевого аэрозоля – пустыни Аравии, Средней Азии (Каракумы, Кызылкум, Муянкум), а еще восточнее –

пустыни Китая и Монголии (Такла-Макан, Цайдам, Гоби). Общее направление переноса аэрозолей здесь – с запада на восток, в сторону Тихого океана.

Общий вклад седиментации аридного аэрозоля в поступление осадочного вещества в Мировой океан оценивается как 1,6 млрд т в год [2]. Это близко к количеству поступающего в пелагиаль речного осадочного вещества [4].

В настоящее время все более актуальны исследования влияния пылевых аэрозолей на различные характеристики морских экосистем. Однако особенности влияния пылевых аэрозолей на оптические, микрофизические и геохимические характеристики Черного моря в настоящее время недостаточно изучены. Еще менее изучено влияние переносов биогенных элементов в пылевом аэрозоле на поверхность Каспийского моря, чем и обусловлена актуальность настоящей работы.

Пустыни Северной Африки – важный источник минеральной пыли в атмосфере [5]. Еще Чарльз Дарвин в своих записях, сделанных во время экспедиции на судне «Бигль» (январь 1832 г.), описывал выпадение значительного количества пыли из атмосферы над Атлантическим океаном в районе о-ва Зеленый мыс [6, 7]. В последующих исследованиях Дарвин собрал около 15 различных сообщений о пыли, которую обнаруживали в определенное время на кораблях в Атлантическом океане вдали от берегов. Дальнейший анализ сезонности этого явления совпал с периодом активности хармата-на (сухого западноафриканского пассата, дующего со стороны Сахары в направлении Гвинейского залива), который поднимает облака пыли

* Дарья Владимировна Калининская (kalinskaya_d_v@mail.ru); Алеся Викторовна Медведева (shift@mail.ua); Анна Адилевна Алескерова (Annete08@mail.ru).

в верхние слои атмосферы. Именно благодаря этому факту Дарвин сделал вывод, что вся эта пыль приносится из Африки. Анализ состава пыли показал наличие мелких минеральных частиц с примесью биогенных элементов (панцирей пресноводных инфузорий, спор сухопутных микроорганизмов).

Пыль Сахары может переноситься на тысячи километров и после осаждения влиять на биогеохимические циклы океана и суши даже в очень удаленных местах. За последние десятилетия участились случаи выпадения пылевых дождей, в том числе на северо-востоке Испании. Авторы [8] отмечают, что газы и взвешенные вещества, поступающие из атмосферы с воздушными массами из Сахары, – важный источник питательных веществ для Средиземного моря. Исследования авторов показывают, что даже единичные осадки такого рода могут влиять на биологическое сообщество (его разнообразие, активность и количество членов) в течение определенного периода времени и таким образом регулировать функцию микробного сообщества и углеродный цикл в олиготрофных водах. Положительная корреляция между осаждением пыли и концентрацией хлорофилла *a* была обнаружена в значительной части Средиземного моря, с хорошо заметным уменьшением коэффициента корреляции с юга на север [9]. Концентрация хлорофилла *a* резко увеличилась после осаждения значительного количества пыли, с пиками концентрации между 1-м и 6-м днями (отсчет дней проводился непосредственно после прохождения пылевой бури); прирост хлорофилла в разных случаях составлял от 13 до 345%.

Пыль может быть важным источником питательных веществ, в значительной степени стимулирующих рост и изменяющих скопления бактерий. Действительно, в некоторых случаях бактериальное сообщество может быть более восприимчивым к пыли, чем крупный фитопланктон, из-за его большей способности поглощать питательные вещества в олиготрофных водах [10, 11].

Таким образом, большинство предыдущих исследований воздействия пыли Сахары на фитопланктон ограничивались несколькими конкретными географическими районами. В последние годы опубликован ряд работ по регистрации пылевых аэрозолей в Арктическом регионе [12–15], а также по влиянию на фитопланктонные сообщества пылевой бури, прошедшей над заливом Петра Великого в 2006 г. [16].

Каспийское море регулярно подвергается воздействию пылевых (песчаных) бурь, источниками которых с востока являются пустыни Каракумы (прилегает с востока к Южному Каспию) и Кызылкум [17], а с юго-запада – Сирийская пустыня и, в отдельных случаях, пустыни Аравийского полуострова. С юга Каспийское море защищено горной системой Эльбрус. В редких случаях на спутниковых снимках выявляются пылевые бури над Северным Каспием.

Цель настоящей работы – изучение влияния пылевого аэрозоля на интенсивность цветения цианобактерий в Каспийском море.

Методы и средства

С учетом района акватории (Северный, Средний и Южный Каспий) (рис. 1) была произведена статистическая оценка влияния пылевого переноса с мая по сентябрь в 2008–2010 гг. на основе оптических данных VIIRS Suomi-NPP, MODIS Aqua/Terra. Кроме того, было проанализировано интенсивное цветение цианобактерий в исследуемый период.

Концентрация осажденных аэрозольных частиц определялась по модельным данным MERRA-2 Dust Dry Deposition (эта модель производит учет сухого осаждения пыли) с дискретностью в месяц и пространственной сеткой $0,5^\circ \times 0,625^\circ$.

В настоящее время активные исследования атмосферного аэрозоля проводятся с использованием данных сети автоматизированных солнечных фотометров AERONET (AErosol RObotic NETwork), которые в автоматическом режиме обрабатываются в NASA. Одним из преимуществ этой сети является использование одинаковых на всех станциях приборов CE-318 – всепогодных программируемых спектрофотометров, которые могут продолжительное время работать в автономном режиме. Стандартная модель прибора CE-318 оснащена интерференционными фильтрами с полосами пропускания: 340, 380, 440, 500, 870, 940 и 1020 нм [18]. В настоящей работе анализируются измерения спектрофотометра, работающего в рамках сети AERONET, расположенного на побережье юго-западной части Каспийского моря (станция IASB, $36,70517^\circ$ с.ш., $48,50711^\circ$ в.д.).

Преимущественный тип аэрозоля определялся из анализа обратных траекторий переноса воздушных масс по модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), разработанной лабораторией атмосферных ресурсов (Air Resources Laboratory (ARL)) [19], а также по спутниковым данным CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) [20–23]. Основной измерительный инструмент CALIPSO – трехканальный радиометр (рабочие длины волн каналов: 8,65; 10,6 и 12,05 мкм). Типы аэрозолей, используемые в CALIPSO, были идентифицированы из кластерного анализа: дым (горящая биомасса), пыль, загрязненная пыль (смесь пыли и дыма), загрязненный континентальный аэрозоль и чистый континентальный аэрозоль [22, 23]. Анализ данных кластеризации типов аэрозолей дает шесть различных вариантов, каждый из которых характеризуется распределением основных оптических параметров и определенным диапазоном коэффициентов деполяризации. В этой классификации «загрязненная пыль» – это аэрозоль, содержащий значительное количество поглощающих частиц. Предполагается, что пустынная пыль в основном состоит из минеральных почв.

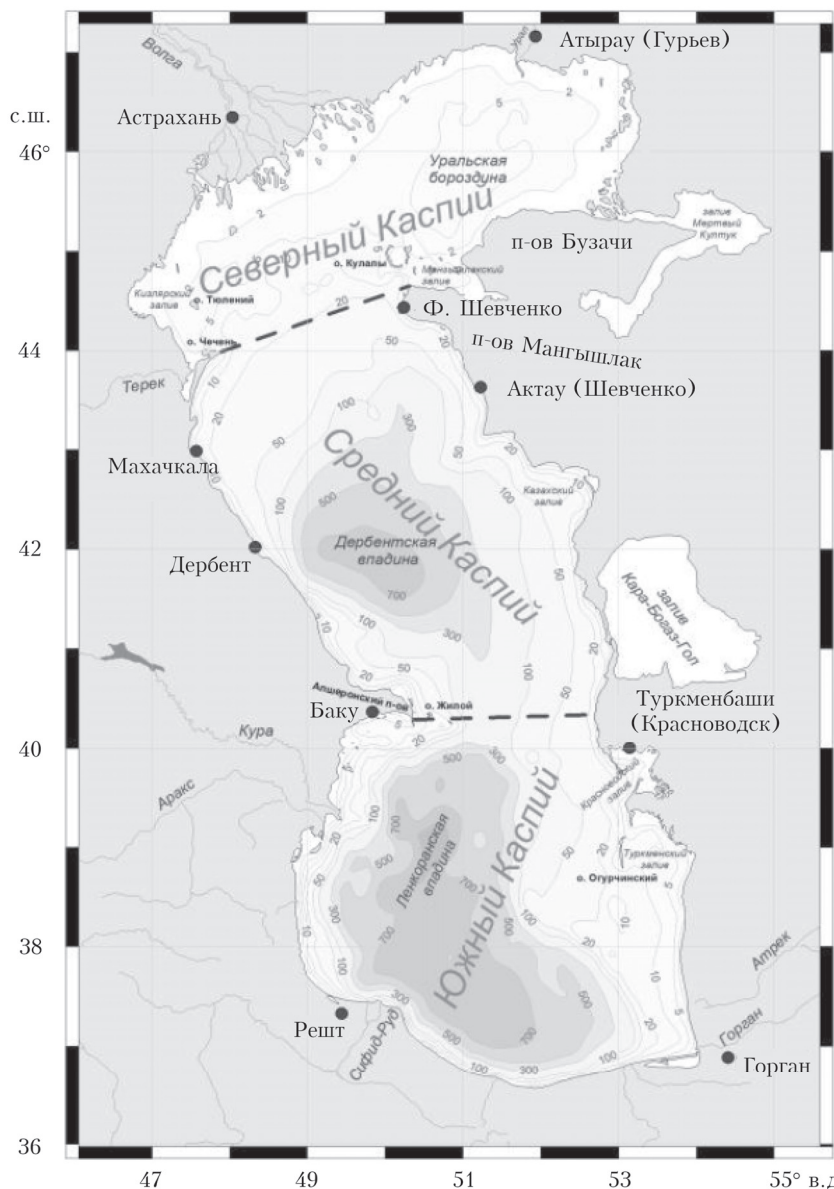


Рис. 1. Каспийское море с разделением на северную, среднюю и южную акватории

Результаты и обсуждение

По спутниковым снимкам в оптическом спектре наличие пыльных бурь выявляется в большей мере над южной частью Каспийского моря (до 7–15 дней в летний месяц), реже — над средней его частью (до 3–9 дней в летний месяц) и в отдельных случаях — над северной (от 0 до 2–3 дней в летний месяц) (рис. 2). Для решения задач восстановления характеристик поверхности моря методами дистанционного зондирования при наличии в атмосфере поглощающего аэрозоля, каковым является пылевой аэрозоль, необходимо проводить атмосферную коррекцию спутниковых изображений [24–26]. Для проведения атмосферной коррекции спутниковых изображений, представленных на рис. 2, необходимо проанализировать оптические характеристики атмосферного аэрозоля в соответствующие дни.

На территории южного побережья Каспийского моря расположена станция AERONET IASB, действующая с 5 декабря 2009 г. Поскольку станция в 2008 и 2009 гг. не работала в периоды, когда был зарегистрирован пылевой перенос, проанализированы только оптические характеристики за 8 июля — 2 августа 2010 г. Максимальная аэрозольная оптическая толщина (АОТ) и превалирование крупнодисперсного аэрозоля в атмосфере были зарегистрированы во второй половине июля 2010 г.: при среднемесечном значении АОТ на длине волны 675 нм $АОТ(675) = 0,216$ максимальное значение $АОТ(675) = 1,002$ было зарегистрировано 15 июля 2010 г.; среднее за период 23–26 июля 2010 г. значение $АОТ(675) = 0,32$, что в 1,5 раза выше среднемесечного значения.

Анализ распределения частиц по размерам показал превалирование грубодисперсной фракции во второй половине июля; значение параметра

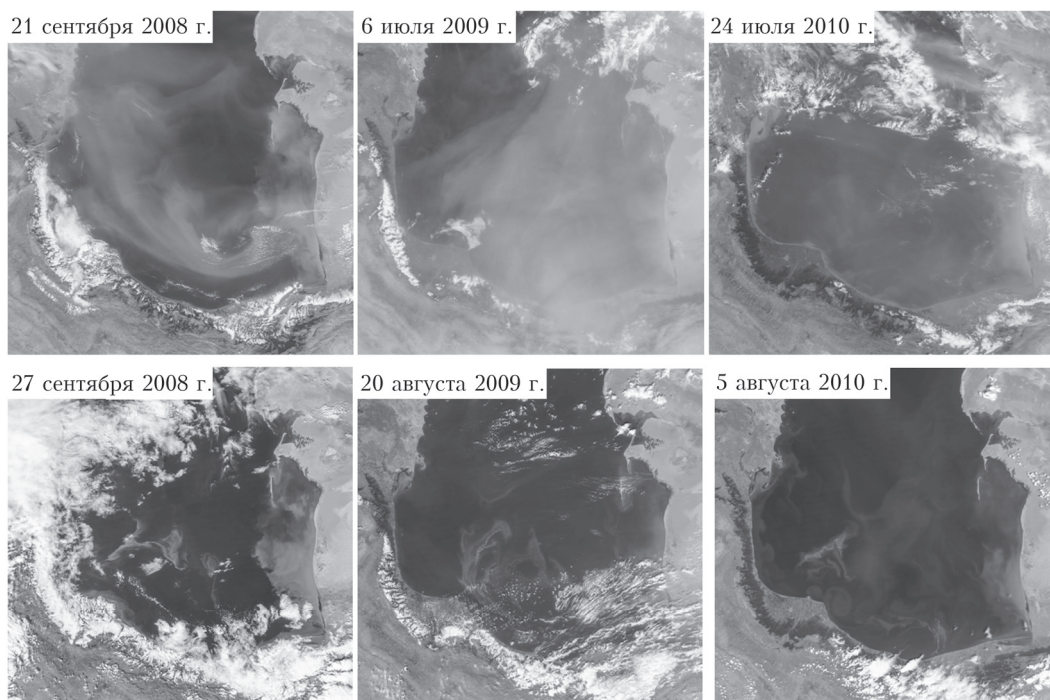


Рис. 2. Пыльные бури над Каспийским морем. Снимки спутников MODIS Aqua и Terra

Ангстрема $\alpha = 0,08$ за 15 июля (при среднемесячном значении $\alpha = 0,6$) также подтверждает присутствие значительного количества крупных (более 2,5 мкм) аэрозольных частиц.

Были определены временные рамки цветения цианобактерий в южной части Каспийского моря в исследуемый период по критериям, описанным в [27], и выделены два этапа: 1) начало цветения, когда регистрируется увеличение биомассы водорослей, однако плавающие цианобактерии не выявляются; 2) интенсивное цветение, когда цианобактерии выявляются как плавающие объекты и развиваются на поверхности вод. Продолжительность этих этапов показана в табл. 1. Выделенные периоды были сопоставлены с датами пылевых переносов над Каспийским морем.

Таблица 1

Периоды экстремального цветения цианобактерий в южной части Каспийского моря

Год	Начало цветения	Интенсивное цветение
2008	8–26.09	27–28.09
2009	6–7.08–18.08	19–22.08
2010	8.07–02.08	3–7.08

Этапы цветения цианобактерий определяются следующими гидрометеорологическими факторами: достаточный прогрев вод (от 25 °С), интенсивный сток рек и длительные периоды ветрового затишья, когда наблюдаются устойчивые ветры со скоростью 5–6 м/с. На цветение различных бактерий в поверхностном слое вод европейских морей также влияют длительные переносы пылевого аэрозоля, который является дополнительным источником

биогенных элементов [28, 29]. Однако взаимосвязь длительных пылевых переносов с изменчивостью концентрации цианобактерий для региона Каспийского моря ранее подробно не изучалась.

Для определения преимущественного типа аэрозоля за периоды экстремального цветения водорослей в южной части Каспийского моря были построены обратные траектории переноса воздушных масс по модели HYSPLIT на двух высотах: 500 и 1000 м (рис. 3). Как видно, 21 сентября 2008 г. и 6 июля 2009 г. были зарегистрированы переносы со стороны пустыни Каракумы, а 24 июля 2010 г. – со стороны африканского континента. Во всех случаях перенос осуществлялся со стороны пустынь, что подтверждается как спутниковыми изображениями, так и данными моделирования.

Для подтверждения присутствия над исследуемым регионом пылевого аэрозоля также были просканированы данные спутника CALIPSO, который работает в паре с американской системой CLOUDSAT (Cloud Satellite), представляющей собой направленный в нади́р радар (94 ГГц), который измеряет обратнорассеянную от облаков энергию как функцию расстояния. Поскольку указанная система является лидаром, с ее помощью можно восстанавливать вертикальную структуру атмосферы.

Траектория спутника CALIPSO не всегда проходит непосредственно над исследуемым в настоящей работе регионом. Чтобы использовать данные этого спутника, были проанализированы ближайшие к Каспийскому морю данные, полученные CALIPSO на 2–3° западнее (когда регистрировался западный перенос воздушных масс) либо на 2–3° восточнее (когда перенос был со стороны востока) (рис. 4). Видно, что в исследуемые дни над Кас-

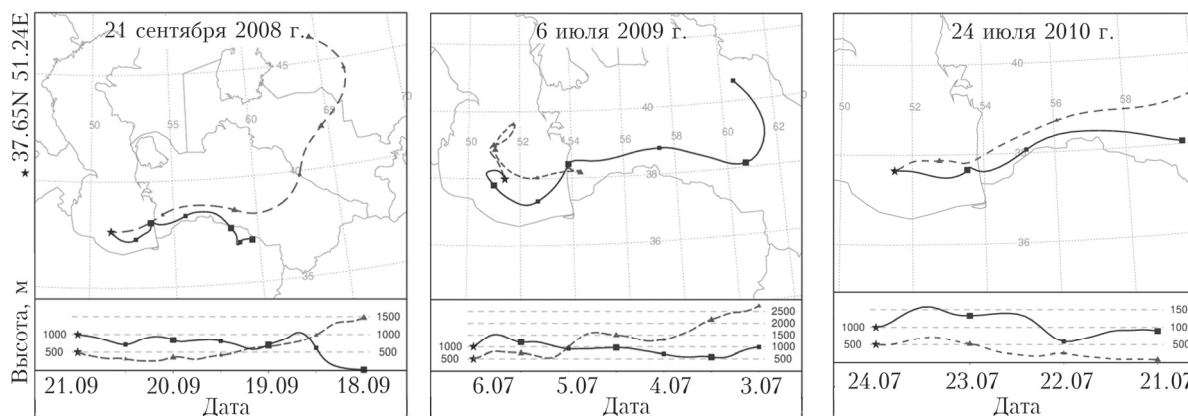


Рис. 3. Обратные траектории переноса воздушных масс по данным модели HYSPLIT

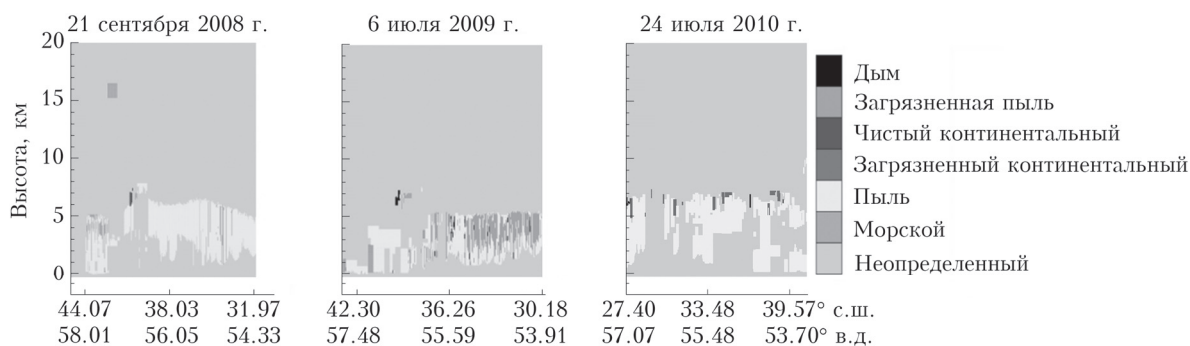


Рис. 4. Типизация аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO

пийским регионом регистрировался преимущественно пылевой аэрозоль, что подтверждает наличие переноса аэрозоля со стороны азиатских пустынь.

Концентрация осажденных аэрозольных частиц над акваторией Каспийского моря (северная, средняя и южная части) определялась по данным MERRA-2 Dust Dry Deposition с января по июнь включительно для каждого исследуемого года (табл. 2).

Таблица 2

Концентрация ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) осажденных аэрозольных частиц над Каспийским морем

Год	Акватория		
	северная	средняя	южная
2008	$2,140 \cdot 10^{-11}$	$2,156 \cdot 10^{-11}$	$2,647 \cdot 10^{-11}$
2009	$2,282 \cdot 10^{-11}$	$2,448 \cdot 10^{-11}$	$2,723 \cdot 10^{-11}$
2010	$2,248 \cdot 10^{-11}$	$2,569 \cdot 10^{-11}$	$2,808 \cdot 10^{-11}$

Наибольшая концентрация за весь исследуемый период получена для южной акватории. Этот факт обусловлен вкладом пылевого аэрозоля, который наиболее часто обнаруживается над указанной акваторией Каспийского моря.

Анализ сезонной изменчивости концентрации осажденных аэрозольных частиц показал, что максимальная концентрация фиксировалась в феврале

над всей акваторией Каспийского моря, а повышенная относительно годовых значений (более, чем в 1,5 раза) – в апреле 2008 г. Этот максимум обусловлен длительными переносами пылевого аэрозоля с юга (Сирийская пустыня) и с юго-запада (пустыня Сахара) в указанный период. В отличие от случаев летних переносов, которые способствуют интенсивному цветению цианобактерий, весенний максимум не вызвал аномалии их развития. Это, как и для случаев зимних переносов, обусловлено низкой температурой воды, которая препятствует цветению такого вида водорослей.

Заключение

Пылевые бури над акваторией Каспийского моря – всесезонное явление. Поступающие с пылевыми переносами аэрозольные частицы – это дополнительный источник биогенных элементов в поверхностный слой моря. Северная, средняя и южная части Каспийского моря значительно различаются по гидрометеорологическим условиям, и, следовательно, по вкладу различных факторов, определяющих возможность аномального цветения цианобактерий. Цветение в северной части Каспийского моря в большей степени вызвано мощным речным стоком Волги в сочетании с малыми глубинами. В южной части объем речного стока меньше,

чем в других частях Каспийского моря, поэтому интенсивность развития цветения цианобактерий определяется комплексом гидрометеорологических условий, таких как штилевые условия на протяжении длительного времени и пылевые переносы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-35-70034 – выделение цветений цианобактерий, грант 20-54-56053 – обработка спутниковых изображений по наличию цветений цианобактерий в южной части Каспийского моря) и в рамках госзадания № 0555-2021-0006 (обработка спутниковых снимков по наличию пылевого аэрозоля), 0827-2021-0002 и 0555-2021-0003 (мониторинг с привлечением данных дистанционного зондирования).

1. Емельянов Е.М., Коль Л.В. Перенос эоловой пыли и ее роль в процессе осадкообразования в Атлантическом океане // Литология и полезные ископаемые. 1979. № 2. С. 3–15.
2. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1398–1439.
3. Лисицын А.П. Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. 2014.
4. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
5. Avila A., Penuelas J. Increasing frequency of Saharan rains over northeastern Spain and its ecological consequences // Sci. Total Environ. 1999. V. 228, N 2–3. P. 153–156.
6. Darwin C. Geological Observations on the Volcanic Islands visited during the voyage of HMS Beagle, together with some brief notices on the geology of Australia and the Cape of Good Hope; being the second part of the Geology of the Voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, RN, during the years 1832 to 1836. London: Smith Elder and Co, 1844. 176 p.
7. Darwin C. Geological observations on the volcanic islands, visited during the voyage of HMS Beagle: together with some brief notices on the geology of Australia and the Cape of Good Hope. England: Cambridge University Press, 2011. 139 p.
8. Guo C., Xia X., Pitta P., Herut B., Rahav E., Berman-Frank I., Giannakourou A., Tsiola A., Tsagaraki T.M., Liu H. Shifts in microbial community structure and activity in the ultra-oligotrophic Eastern Mediterranean Sea driven by the deposition of Saharan dust and European aerosols // Frontiers in Marine Science. 2016. V. 3. P. 170.
9. Gallisai R., Peters F., Volpe G., Basart S., Baldasano J.M. Saharan dust deposition may affect phytoplankton growth in the Mediterranean Sea at ecological time scales // PloS one. 2014. V. 9, N 10. P. e110762.
10. Pulido-Villena E., Wagener T., Guieu C. Bacterial response to dust pulses in the western Mediterranean: Implications for carbon cycling in the oligotrophic ocean // Global Biogeochem. Cycl. 2008. V. 22, N 1. DOI: 10.1029/2007GB003091.
11. Maracén E., Fernández A., Mourino-Carballido B., Martínez-García S., Teira E., Cermeno P., Choucico P., Martínez-Rodríguez S., Teira E., Fernández E., Calvo-Díaz A., Xosé Anxelu G. Morán, Bode A., Moreno-Ostos E., Varela M.M., Patey M., Achterber E.P. Degree of oligotrophy controls the response of microbial plankton to Saharan dust // Limnol. Oceanog. 2010. V. 55, N 6. P. 2339–2352.
12. Yli-Tuomi T., Venditte L., Hopke P.K., Basunia M.S., Landsberger S., Viisanen Y., Paatero J. Composition of the Finnish Arctic aerosol: Collection and analysis of historic filter samples // Atmos. Environ. 2003. V. 37, N 17. P. 2355–2364.
13. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 29–30. P. 5151–5160.
14. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Куценогий К.П., Смирнов В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду // XIII раб. группа «Аэрозоли Сибири», 28 ноября – 1 декабря 2006 г. С. 148–184.
15. Поповичева О.Б., Макитас А.П., Мовчан В.В., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Ситников Н.М. Аэрозольная составляющая приземного слоя атмосферы по данным наблюдений экспедиции «Север-2015» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4. С. 57–65.
16. Крикун В.А. Метод и аппаратные комплексы для исследования воздействия атмосферного аэрозоля на биооптические параметры морской воды: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2008. 16 с.
17. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 380 с.
18. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote F., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankoviak I., Sмирнов А. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. N 66. P. 1–16.
19. NOAA HYSPLIT Trajectory Model [Electronic resource]. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 7.05.2021)
20. Klett J.D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 211–220.
21. Ansmann A., Müller D. Lidar and atmospheric aerosol particles // Lidar. 2005. P. 105–141.
22. Müller D., Ansmann A., Mattis I., Tesche M., Wandinger U., Althausen D., Pisani G. Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. D16202. DOI: 10.1029/2006JD008292.
23. Omar A.H., Winker D.M., Vaughan M.A., Hu Y., Trepte C.R., Ferrare R.A., Lee K., Hostetler C.A., Kittaka C., Rogers R.R., Kuehn R.E., Liu Z. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm // J. Atmos. Ocean. Technol. 2009. V. 26. P. 1994–2014. DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1.
24. Суслин В.В., Слабакова В.Х., Калинин Д.В., Пряхина С.Ф., Головкин Н.И. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений // Морской гидрофиз. журн. 2016. Т. 187, № 1. С. 20–32.
25. Лысенко С.А. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых снимков на основе аппроксимационной модели переноса солнечного излучения // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 9. С. 775–788.
26. Белов В.В., Тарасенков М.В., Энгель М.В., Гринев Ю.В., Зимовая А.В., Познахарев Е.С., Абрамочкин В.Н., Федосов А.В., Кудрявцев А.Н. Атмосферная коррекция спутниковых изображений земной

- поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Оптическая связь на рассеянном излучении // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 753–757.
27. *Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Лишаев П.Н., Мизюк А.И.* Цветение цианобактерий в Азовском море по данным сенсоров спутников серии LANDSAT // Исследование Земли из космоса. 2018. № 6. С. 52–64.
28. *Калинская Д.В., Алескерова А.А.* Аномальные оптические характеристики прибрежных вод западной части Черного моря в весенне-летний период 2020 года // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XXV Междунар. симпоз. (в печати).
29. *Varenik A.V., Kalinskaya D.V.* The effect of dust transport on the concentration of chlorophyll-A in the surface layer of the Black Sea // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 4692. DOI: 10.3390/app11104692.

D.V. Kalinskaya, A.V. Medvedeva, A.A. Aleskerova. **Influence of dust transport on the intensity of cyanobacterial bloom in Caspian Sea.**

The events of the dust aerosol transport to the water and coastal areas of the Caspian Sea during 2008–2010 are analyzed. This aerosol type is shown to be an additional source of biogenic elements in the surface layer of the sea. The comparative analysis of the optical characteristics of the northern, middle, and southern parts of the Caspian Sea, which significantly differ in hydrometeorological conditions and, hence, in the contribution of various factors which determine a possibility of anomalous cyanobacteria blooming, has been carried out. The effect of dust aerosol on the bloom of cyanobacteria is maximal in the southern part of the region under study. The results of the study of algae bloom anomalies in the Caspian Sea region are presented.