

## РАСТВОРЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ВОДОЕМОВ КУМО-МАНЫЧСКОЙ ВПАДИНЫ

*В.С. Герасюк, А.А. Жерлицына, А.В. Подобедова, А.В. Клещенок*

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону  
gerasyuk.v@mail.ru, aleksandra.zherlicyna@mail.ru,  
podobedova.alenka@mail.ru, geo@ssc-ras.ru

**Аннотация.** Водоемы Кумо-Манчской впадины являются уникальной площадкой для изучения эвтрофных процессов в водных экосистемах аридных зон. Одним из ключевых показателей трофности является содержание растворенного органического углерода (РОВ). Оптические свойства РОВ позволили качественно и количественно оценить часть светопоглощающего пула растворенного органического вещества, выявить зависимость от минерализации и разделить все водоемы Кумо-Манчской впадины на три типа вод. Метод спектральных коэффициентов позволил получить представление о молекулярной массе, «возрасте» и происхождении окрашенной части РОВ (ОРОВ). Сформирован вывод о том, что ОРОВ реликтового озера Маныч-Гудило является автохтонным и состоит из свежобразованных соединений, которые слабо поглощают в ближней УФ-области спектра. Распресненные воды системы водохранилищ Кумо-Манчской впадины обеспечены меньше всего ОРОВ и имеют преимущественно аллохтонное происхождение. Мелкие гипергалинные водоемы (озера Круглое, Лопуховатое, Лебяжье, Грузское) с минерализацией 60–150 г/л и более пресные (пруды Чабрецы, Виноградный) с минерализацией в среднем 15 г/л содержат одинаковое количество ОРОВ.

**Ключевые слова:** окрашенное растворенное органическое вещество, водоемы Кумо-Манчской впадины, гипергалинные озера, спектры поглощения.

Растворенное органическое вещество (РОВ) является доминирующим источником углерода в водных экосистемах и играет важную роль в региональном или даже глобальном углеродном цикле. Часть РОВ, ее водорастворимая невзвешенная фракция, имеющая желтоватый цвет и названная желтым веществом (“gilvin”, “yellow substance”, “humic substances” “chromophore dissolved organic matter” (CDOM)), включает продукты разложения планктона, поступающий с поверхностным стоком водный гумус, а также растительные пигменты, которые обуславливают преимущественно ослабление коротковолнового излучения.

Окрашенное растворенное органическое вещество (ОРОВ) поглощает не только видимый свет, но и свет в ультрафиолетовой области спектра. Поглощение света ОРОВ может хорошо распространяться на видимые длины волн, часто преобладая над поглощением фитопланктоном в синей части видимого спектра. В этой ситуации количество и качество фотосинтетически активной радиации, доступной фитопланктону, сокращается, что снижает первичную продуктив-

ность и влияет на структуру экосистемы. Кроме того, высокая степень поглощения ОРОВ может серьезно ухудшить определение биомассы фитопланктона по спутниковым измерениям, что затрудняет получение более точных региональных и глобальных оценок первичной продуктивности. ОРОВ может играть существенную роль в биогеохимии природных вод только благодаря своему влиянию на водное световое поле [1; 2].

Такие небольшие водоемы, как озера, остаются наименее изученными и не анализируются систематически, при этом имеющиеся исследования говорят о том, что в последние годы степные озера подвержены двум стрессовым факторам: эвтрофикации и аномально высоким концентрациям органического вещества. С усилением эвтрофикации в озерах по всему миру количество вспышек цианобактерий значительно увеличивается, а биоразнообразие водных систем уменьшается [3; 4].

Система озер Кумо-Манчской впадины, расположенная в аридной зоне, где плотность населения невелика, а влияние человека относительно ограничено, считается важнейшей экосистемой,

обеспечивающей уникальную среду обитания для местных птиц и других водных организмов. По результатам проведенных ранее исследований установлено, что большинство озер, в том числе реликтовое озеро Маныч-Гудило, являются высокоминерализованными и содержат весьма высокие концентрации растворенного органического углерода – около 50 мг С/л. [5–8]. Однако мало что известно об источниках и составе органического вещества. Многие еще предстоит понять в отношении взаимодействия, которое может происходить между РОВ и стабильностью экосистемы.

Данная работа направлена на изучение оптических свойств окрашенной части РОВ водоемов Кумо-Манычской впадины. Оптические свойства ОРОВ можно использовать в качестве информации не только о количественном, но и качественном составе ОРОВ, его происхождении и источнике.

**Материалы и методы исследования.** Образцы проб воды на различных станциях исследуемого объекта отбирались в июле и августе 2021 г., октябре 2022 г., марте и апреле 2023 г. Всего было отобрано 22 образца. После полевого отбора исходная вода профильтровывалась через стекловолоконный фильтр MGF с условным размером пор 0,7 мкм, фильтрат хранился при низкой температуре до лабораторных измерений.

Определение спектров поглощения ОРОВ проводилось на двухлучевом спектрофотометре “Thermo Evolution” с регистрацией спектра поглощения в области 220–400 нм в кварцевой кювете с длиной оптического пути 50 мм. Измерения проводились после того, как образцы были уравновешены до лабораторной температуры.

При описании спектральных характеристик ОРОВ в настоящий момент активно используется метод спектральных коэффициентов [9; 10]

с использованием значений поглощения на длинах волн 254, 275, 295, 350, 400 нм в соответствии с ранее описанным подходом [5].

Коэффициенты поглощения СОМ рассчитывались как:

$$a(\lambda) = 2,303A(\lambda) / L,$$

где  $L$  – длина оптического пути в метрах,  $A$  – оптическая плотность [11]

На каждой станции дополнительно измеряли соленость (минерализацию) лабораторным рутинным способом.

**Результаты и обсуждение.** Для качественного анализа ОРОВ в работе использован ряд оптических характеристик: коэффициент поглощения  $a_{254}$ , спектральный угол наклона  $S$ , отношение спектральных углов наклона  $SR = S_{275-295} / S_{350-400}$  и отношение коэффициентов поглощения ОРОВ при 250 нм и 365 нм ( $a_{250} : a_{365}$ ). Использование таких оптических параметров позволяет получить представление о качественных свойствах ОРОВ, таких как молекулярная масса, состав, возраст и содержание ароматических соединений для различных географических регионов, в том числе озер [12–14].

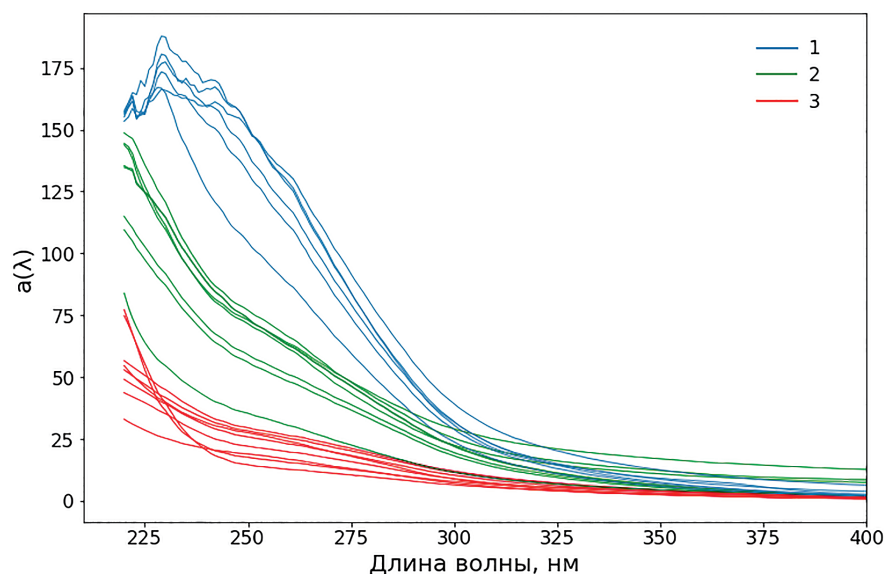
Таким образом, мы использовали метод для расчета спектральных характеристик, который согласуется с предыдущими исследованиями, чтобы сравнить наборы данных (табл. 1).

Спектры поглощения ОРОВ (200–400 нм) показали четкое разделение между тремя типами водных объектов: озером Маныч-Гудило, системой мелких водоемов и более распресненными водами водохранилища (рис. 1). Характер распределения спектра поглощения в ближней УФ-области для озера Маныч-Гудило имеет особенность, связанную, по всей видимости, со свежим новообразованным ОРОВ, которое не поглощает ультрафиолет, как это происходит в случае более древнего ОРОВ.

**Таблица 1.** Характеристика спектров поглощения ОРОВ водоемов Кумо-Манычской впадины

Объект	Count	S275–295		S350–400		$a_{250} : a_{365}$		$S_R$		$a_{254}$	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
1	8	0,37	0,08	0,08	0,02	11	4	4,6	0,5	61	13
2	6	0,89	0,13	0,11	0,02	22	5	8,0	0,7	129	17
3	8	0,13	0,04	0,05	0,01	9	2	2,8	0,9	22	5

*Примечание.*  $S$  – спектральный угол наклона,  $SR$  – соотношение спектральных углов наклона,  $a$  – коэффициент поглощения, count – количество определений, mean – среднее значение, std – стандартное отклонение. Объекты: 1 – мелкие водоемы Кумо-Манычской впадины (пруды Чабрецы, Виноградный, озера Круглое, Лопуховатое, Лебяжье, Грузское), 2 – озеро Маныч-Гудило, 3 – система водохранилищ Кумо-Манычской впадины (Веселовское и Пролетарское водохранилища).



**Рис. 1.** Спектры поглощения хромофорного растворенного органического углерода в диапазоне 220–400 нм для всех образцов: 1 – озеро Маныч-Гудило, 2 – мелкие водоемы Кумо-Манычской впадины (пруды Чабрецы, Виноградный, озера Круглое, Лопуховатое, Лебяжье, Грузское), 3 – система водохранилищ Кумо-Манычской впадины (Веселовское и Пролетарское водохранилища)

Минимальные значения  $S_{275-295}$  ( $0,13 \text{ нм}^{-1}$ ), обнаруженные в распресненных водохранилищах, характерны для вод с доминирующим влиянием аллохтонного РОВ, напротив, довольно высокие значения ( $0,89 \text{ нм}^{-1}$ ) зафиксированы в самом озере Маныч-Гудило. К водам большого реликтового озера относится максимум  $S_R(8,0)$ , что очередной раз подтверждает высокопродуктивность этой экосистемы.

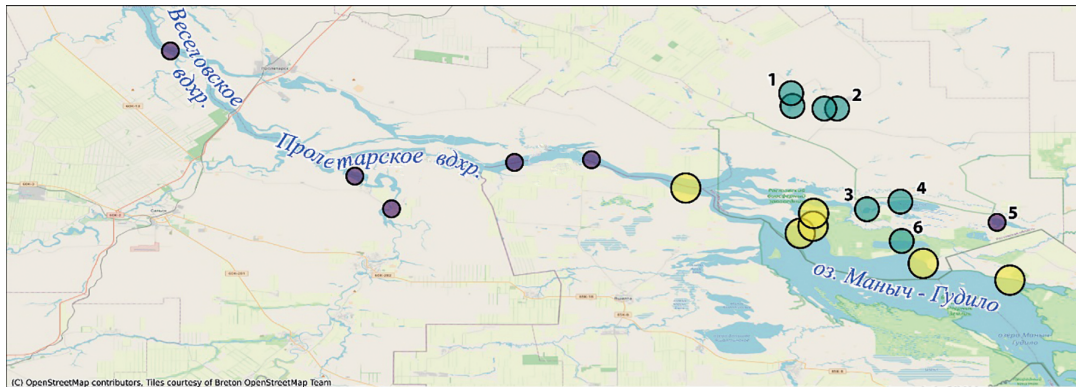
Соотношение  $a_{250} : a_{365}$  отрицательно коррелирует с усредненной по массе молекулярной массой [15]. Так, наиболее высокое соотношение в озере Маныч-Гудило указывает на то, что озеро постоянно производит лабильный РОВ.

С точки зрения получения данных об абсолютной концентрации и «возраста» для всех исследуемых водоемов Кумо-Манычской впадины, был использован коэффициент поглощения на длине волны 254 нм. Проведенная классификация Natural Breaks (Jenks) полученных значений коэффициента поглощения на длине волны 254 нм позволила выделить три типа вод для всех водоемов Кумо-Манычской впадины (рис. 2). При помощи данной классификации границы классов определяются статистически, методом поиска соседних пар объектов, между которыми имеется существенное различие в значениях ячеек. Воды озера Маныч-Гудило характеризовались наибольшей

абсолютной концентрацией ОРОВ, превышая в среднем в два раза ОРОВ мелких водоемов и в 6 раз ОРОВ вод водохранилищ. Исключением является озеро Лебяжье, которое на момент отбора проб имело дополнительный источник распреснения.

Соленость (минерализация) является важным показателем состояния озер и параметром, который отслеживает такие гидрологические изменения, как осадки, испарение и засуха в озерных бассейнах. Соленость влияет на рост и метаболизм водорослей, адсорбцию азотных и фосфорных питательных веществ взвешенными частицами. Кроме того, некоторые исследования показали, что в соленых озерах концентрация ОРОВ обычно выше, чем в пресноводных, также существенно отличаются оптические свойства и состав ОРОВ в соленых и пресных озерах [16].

На рисунке 3 видно, что многие водоемы Кумо-Манычской впадины имеют характеристики засоления. Полученные данные о высоком уровне концентрации ОРОВ в высокоминерализованных водах могут расцениваться как подтверждение действия испарительного концентрирования. В то же время в менее минерализованных прудах Чабрецы и Виноградный содержание находится на таком же высоком уровне.



Коэффициенты оптической плотности на длине волны 254 нм:



Рис. 2. Пространственное распределение коэффициента поглощения  $a_{254}$  ( $m^{-1}$ ) с использованием классификации Natural Breaks (Jenks): 1 – пруд Чабрецы, 2 – пруд Виноградный, 3 – оз. Круглое, 4 – оз. Лопуховатое, 5 – оз. Лебяжье, 6 – оз. Грузское

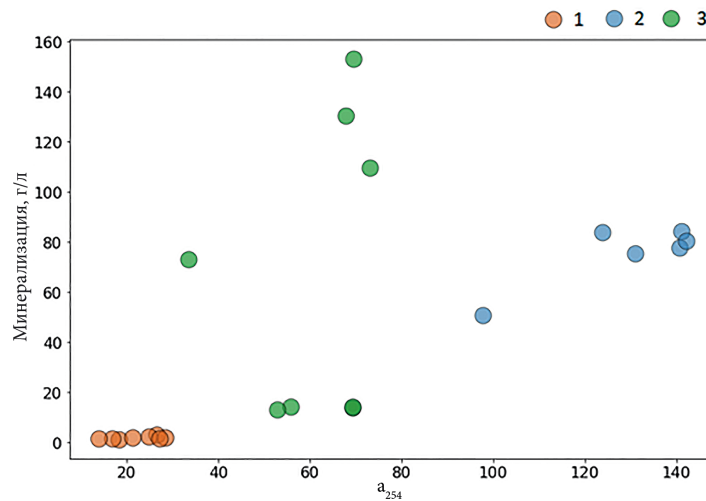


Рис. 3. Зависимость минерализации (г/л) от коэффициента поглощения  $a_{254}$  ( $m^{-1}$ ): 1 – система водохранилищ Кумо-Манычской впадины (Веселовское и Пролетарское водохранилища), 2 – озеро Маныч-Гудило, 3 – мелкие водоемы Кумо-Манычской впадины (пруды Чабрецы, Виноградный, озера Круглое, Лопуховатое, Лебяжье, Грузское)

**Заключение.** Изучение оптических характеристик водоемов Кумо-Манычской впадины позволяет сделать вывод о высокой эвтрофности водных объектов, как гипергалинных, так и распресненных.

На основе полученных данных спектральных характеристик выявлены различия не только в количественных, но и качественных оценках состава окрашенной части растворенного орга-

нического вещества водоемов. Рассмотрена взаимосвязь с гидрологическими (минерализация) параметрами среды. Получено общее представление о формировании окрашенной части растворенного органического вещества водоемов засушливых зон. Следует продолжать пополнение базы данных спектральных показателей для получения более детального анализа и причин таких аномальных спектральных характеристик.

Публикация подготовлена в рамках выполнения темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН «Разработка системы климатического и экологического мониторинга Азовского моря и обеспечение ее функционирования», № госрегистрации 123071900007-8.



Список литературы

1. Coble P.G. Marine Optical Biogeochemistry. The Chemistry of Ocean Color // Chemical Reviews. 2007. Vol. 107. P. 402–418.
2. Hessen D.O., Carroll J., Kjeldstad B., Korosov A.A., Pettersson L.H., Pozdnyakov D., Sorensen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries // Estuar Coast Shelf. 2010. No. 88. P. 53–62.
3. Smith V.H., Schindler D.W. Eutrophication science: Where do we go from here? // Trends Ecol. Evol. 2009. No. 24. P. 201–207.
4. Krzto 'n W., Kosiba J., Pocięcha A., Wilk-Wo 'zniak E. The effect of cyanobacterial blooms on bio-and functional diversity of zooplankton communities // Biodivers. Conserv. 2019. No. 28. P. 1815–1835.
5. Со́йер В.Г., Поважный В.В., Алёшина Е.Г. Биогенные элементы и продукция в водах озера Маныч-Гуди́ло // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России: мат-лы науч.-практ. конф. с междунар. участ. Ч. 2. (г. Азов, 8–10 июля 2009 г.). Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН, 2009. С. 216–218.
6. Со́йер В.Г. Органическое вещество и биогенные элементы в водах гипергалинного озера Маныч-Гуди́ло. Современные проблемы гидроэкологии // Тезисы докладов 4-й Междунар. науч. конф., посвящ. памяти проф. Г.Г. Винберга (г. Санкт-Петербург, 11–15 окт. 2010 г.). СПб.: ЗИН РАН, 2010. С. 168.
7. Клещенок А.В., Со́йер В.Г., Алёшина Е.Г., Григоренко К.С., Милутка М.С., Олейников Е.П., Булышева Н.И., Сушко К.С. Гидрометеорологические и гидролого-гидрохимические условия восточной части Пролетарского водохранилища и водоемов долины Маныча в современный период // Труды Южного научного центра. 2018. Т. 7. С. 38–56.
8. Филатова Т.Б., Клещенок А.В., Алёшина Е.Г. Озеро Маныч-Гуди́ло: динамика ионного состава и минерализации // Материалы Международного научного форума, посвященного 20-летию ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону, 8–10 февр. 2023 г.). Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2023. 416 с.
9. Пу́гач С.П., Пипко И.И., Семилетов И.П., Сергиенко В.И. Оптические характеристики растворенного окрашенного органического вещества на Восточно-Сибирском шельфе // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 608–608.
10. Fichot C.G., Benner R. A novel method to estimate DOC concentrations from CDOM absorption coefficients in coastal waters // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38. No. 3. P. L03610. DOI: 10.1029/2010GL046152.
11. Green S.A., Blough N.V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39. No. 8. P. 1903–1916.
12. Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnol. Oceanogr. 2008. Vol. 53. P. 955–969.
13. Zhe Wang, Min L, Chu-Long Huang, Dong-Dong Zhang, Ruixia Han, Gang Li, Ling-Xin Chen. Optical properties of sedimentary dissolved organic matter in intertidal zones along the coast of China: Influence of anthropogenic activities // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 864. P. 161159 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161159.
14. Xintong Jiang, Dong Liu, Junli Li, Hongtao Duan. Eutrophication and salinization elevate the dissolved organic matter content in arid lakes. // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 864. P. 161159 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161159. // Environmental Research. 2023. Vol. 233. P. 116471. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116471.
15. Olefeldt D., Roulet N.T. Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex // J. Geophys Res. Biogeosci. 2012. Vol. 117. No. G01005. P. 1–15. DOI: 10.1029/2011JG001819
16. Wen Z.D., Song K.S., Shang Y.X., Zhao Y., Fang C., Lyu L.L. Differences in the distribution and optical properties of DOM between fresh and saline lakes in a semiarid area of Northern China // Aquat. 2018. Vol. 80. No. 2. P. 1–12.

DISSOLVED ORGANIC MATTER OF THE WATER BODIES  
OF THE KUMO-MANYCH BED

V.S. Gerasyuk, A.A. Zherlitsyna, A.V. Podobedova, A.V. Kleshchenkov

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don  
gerasyuk.v@mail.ru, aleksandra.zherlitsyna@mail.ru, podobedova.alenka@mail.ru, geo@ssc-ras.ru

**Abstract.** The reservoirs of the Kuma-Manch depression are a unique platform for studying eutrophic processes in aquatic ecosystems of arid zones. One of the key indicators of trophicity is the content of dissolved organic carbon (DOM). The optical properties of DOM made it possible to qualitatively and quantitatively evaluate a part of the light-absorbing pool of dissolved organic matter, reveal the dependence on mineralization, and divide all reservoirs of the Kuma-Manych depression into three types of water. The method of spectral coefficients made it possible to obtain an idea of the molecular weight, "age" and origin of the colored part of DOM (CDOM). It was concluded that the CDOM of the relict Manych-Gudilo Lake is autochthonous and consists of freshly formed compounds that weakly absorb in the near UV region of the spectrum. The desalinated waters of the reservoir system of the Kuma-Manych depression are provided with the least CDOM and are predominantly of allochthonous origin. Small hypersaline water bodies (Krugloye Lake, Lopukhovatoye Lake, Lebyazhye Lake, Gruzskoye Lake) with salinity of 60–150 g/l and freshwater bodies (Chabrecy Pond, Vinogradnyj Pond) with an average salinity of 15 g/l contain the same amount of CDOM.

**Keywords:** colored dissolved organic matter, reservoirs of the Kuma-Manych depression, hypersaline lakes, absorption spectra.

References

1. Coble P.G. Marine Optical Biogeochemistry. The Chemistry of Ocean Color. Chemical Reviews. 2007. Vol. 107. P. 402–418.
2. Hessen D.O., Carroll J., Kjeldstad B., Korosov A.A., Pettersson L.H., Pozdnyakov D., Sorensen K. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivity in the Ob and Yenisey estuaries. Estuar Coast Shelf. 2010. No. 88. P. 53–62.
3. Smith V.H., Schindler D.W. Eutrophication science: Where do we go from here? Trends Ecol. Evol. 2009. No. 24. P. 201–207.
4. Krztoń W., Kosiba J., Pocięcha A., Wilk-Woźniak E. The effect of cyanobacterial blooms on bio- and functional diversity of zooplankton communities. Biodivers. Conserv. 2019. No. 28. P. 1815–1835.
5. Sawyer V.G., Povazhny V.V., Aleshina E.G. Biogenic elements and products in the waters of Lake Manych-Gudilo. *Sovremennye fundamental'nye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod Rossii*. [Modern fundamental problems of hydrochemistry and monitoring of the quality of surface waters in Russia. Proceedings of the scientific-practical conference. Part 2. (Azov, July 8–10, 2009). Rostov-on-Don: SSC RAS, 2009. P. 216–218. (In Russian).
6. Sawyer V.G. Organic matter and biogenic elements in the waters of the hyperhaline Lake Manych-Gudilo. Modern problems of hydroecology. *Tezisy dokladov 4-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora G.G. Vinberga*. [Abstracts of the 4<sup>th</sup> Int. Scientific Conference dedicated to the memory of Prof. G.G. Vinberg (October 11–15, 2010, St. Petersburg)]. St. Petersburg: Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences. 2010. P. 168. (In Russian).
7. Kleshchenkov A.V., Sawyer V.G., Aleshina E.G., Grigorenko K.S., Milutka M.S., Oleinikov E.P., Bulysheva N.I., Sushko K.S. Hydrometeorological and hydrologohydrochemical conditions of the eastern part of the Proletarskoe reservoir and reservoirs of the Manych valley in the modern period. *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. [Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2018. Vol. 7. P. 38–56. (In Russian).
8. Filatova T.B., Kleshchenkov A.V., Alyoshin E.G. Lake Manych-Gudilo: dynamics of ionic composition and mineralization. *Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma, posvyashchennogo 20-letiyu Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. [Proceedings of the Int. Scientific Forum dedicated to the 20<sup>th</sup> anniversary of the SSC RAS (Rostov-on-Don, February 8–10, 2023)]. Rostov-on-Don: SSC RAS Publ., 2023. 416 p. (In Russian).
9. Pugach S.P., Pipko I.I., Semiletov I.P., Sergienko V.I. Optical characteristics of dissolved colored organic matter on the East Siberian shelf. *Dokl. Akademii nauk*. 2015. Vol. 465. No. 5. P. 608–608. (In Russian).
10. Fichot C.G., Benner R. A novel method to estimate DOC concentrations from CDOM absorption coefficients in coastal waters. *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. No. 3. P. L03610. DOI:10.1029/2010GL046152
11. Green S.A., Blough N.V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 1994. Vol. 39. No. 8. P. 1903–1916.
12. Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 2008. Vol. 53. P. 955–969.

13. Zhe Wang, Min L, Chu-Long Huang, Dong-Dong Zhang, Ruixia Han, Gang Li, Ling-Xin Chen. Optical properties of sedimentary dissolved organic matter in intertidal zones along the coast of China: Influence of anthropogenic activities. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 864. P. 161159. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161159.
14. Xintong Jiang, Dong Liu, Junli Li, Hongtao Duan. Eutrophication and salinization elevate the dissolved organic matter content in arid lakes. *Environmental Research*. 2023. Vol. 233. P. 116471. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116471.
15. Olefeldt D., Roulet N.T. Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex. *J. Geophys Res. Biogeosci.* 2012. Vol. 117. No. G01005. P. 1–15. DOI: 10.1029/2011JG001819
16. Wen Z.D., Song K.S., Shang Y.X., Zhao Y., Fang C., Lyu L.L. Differences in the distribution and optical properties of DOM between fresh and saline lakes in a semiarid area of Northern China. *Aquat.* 2018. Vol. 80. No. 2. P. 1–12.