

Спектральные свойства растворенного органического вещества и их зависимость от глубины в искусственно и естественно отделенных меромиктических водоемах

© Ю.Г. Соколовская¹, Н.А. Демиденко², Е.Д. Краснова¹, Д.А. Воронов³, А.С. Саввичев⁴, С.В. Пацаева¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН,
117997 Москва, Россия

³ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,
127051 Москва, Россия

⁴ Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН,
117312 Москва, Россия

e-mail: yu.sokolovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

В окончательной редакции 15.01.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

Исследованы спектральные свойства растворенного органического вещества природной воды двух частей искусственно отделенного от Белого моря водоема — губы Канда: морского плеса и меромиктического Федосеевского плеса. Для сравнения проанализированы данные для естественных меромиктических водоемов — озера Елового, Трехцветного, Лагуны на Зеленом мысе. Для проб воды с разных горизонтов получены спектры поглощения, спектры флуоресценции и зависимости квантового выхода флуоресценции от длины волны возбуждения в диапазоне изменения длины волны возбуждения 250–500 нм. Построены зависимости длины волны максимума испускания от длины волны возбуждения и рассчитана величина „синего сдвига“ — смещения максимума полосы испускания в коротковолновую сторону. Показано, что интенсивность флуоресценции растворенного органического вещества в Федосеевском плесе выше, чем в морском, при этом зависимость квантового выхода флуоресценции от длины волны возбуждения в обеих частях Канда-губы имеет качественно сходный характер, но различается абсолютными значениями. В естественных меромиктических водоемах эта зависимость имеет аналогичный характер, также различаясь абсолютной величиной квантового выхода флуоресценции, что говорит о разном соотношении ароматических и алифатических органических соединений. Таким образом, выявлены различия в спектрально-оптических свойствах растворенного органического вещества двух частей искусственно отделенного водоема и природных водоемах, изолированных от Белого моря. Спектрально-оптические характеристики водной толщи морских заливов, естественно или искусственно отделенных от основного морского бассейна, могут служить объективным индикатором трофического (экологического) состояния водоема.

Ключевые слова: растворенное органическое вещество (РОВ), природная вода, спектроскопия поглощения, флуоресцентная спектроскопия, квантовый выход флуоресценции.

DOI: 10.61011/OS.2024.04.58215.25-24

Введение

Растворенное органическое вещество (РОВ), содержащееся в природной воде любого типа, играет важную роль в природных биохимических процессах и влияет на функционирование водных экосистем [1–4]. Окрашенное РОВ природного происхождения эффективно поглощает УФ свет и люминесцирует, от его состава и концентрации зависят оптические свойства природной воды. В настоящее время для его исследования успешно применяются спектроскопия поглощения света и флуоресцентная спектроскопия. Спектры поглощения и флуоресценции природной воды можно использовать для качественной и количественной характеристики РОВ природной воды (в экологическом мониторинге

и дистанционном зондировании). Так, например, в работах [3,5–9] флуоресцентную спектроскопию и спектроскопию поглощения использовали для исследования РОВ природной воды: Карского моря [3,5,6], моря Лаптеевых [7], Онежского залива Белого моря [8], а также воды пресноводных озер Карелии [9]. Отдельный интерес для исследования состава и распределения РОВ представляют меромиктические водоемы — водоемы с устойчивой вертикальной стратификацией, которая возникает из-за разной плотности слоев воды. Примером таких водоемов служат прибрежные водоемы, отделившиеся от Белого моря [10,11]. Из-за накопления растворенной и взвешенной органики и активного потребления кислорода гетеротрофными микроорганизмами в их придонном слое нередко возникают анаэробные условия. Исследование

РОВ в разных слоях прибрежных водоемов, находящихся на разных стадиях изоляции от моря, важно для понимания их эволюции и для разработки методов экологического мониторинга водных экосистем.

Изоляция может быть естественной, например, вследствие послеледникового поднятия берега, как в случае прибрежных водоемов беломорского региона [10,11], или же искусственной либо ускоренной посредством антропогенного вмешательства, например, при гидротехническом строительстве. В природных меромиктических озерах присутствует верхний аэробный слой воды и нижний слой с более высокой плотностью, который не перемешивается с верхним. Переходная градиентная зона между двумя этими слоями называется хемоклином. В верхней части хемоклина в небольшом количестве еще есть растворенный кислород, а в нижней части хемоклина с анаэробными условиями при условии проникновения солнечного света может наблюдаться массовое развитие аноксигенных фототрофных бактерий [12].

Примером искусственно отделенного водоема служит губа Канда в вершине Кандалакшского залива Белого моря, которую отсекали от основной акватории залива двумя фильтрующими дамбами. Ее связь с Белым морем была нарушена в конце 1916 г., когда была построена первая железнодорожная дамба. Вторая дамба, сооруженная в 1968 г., усилила изоляцию [10,13,14]. В настоящее время губа Канда представляет собой систему из связанных между собой водоемов, включающую внешний морской плес, средние плесы, в которых устойчиво сосуществуют пресная и соленая водные массы, и пресное озеро. Их можно рассматривать как разные стадии изоляции от моря [15,16]. В средних, меромиктических, плесах глубоководные застойные воды характеризуются значительной концентрацией растворенного сероводорода [15]. Нарушение приливно-отливного режима приводит к существенным нарушениям бентосных сообществ, в том числе состава микробных сообществ [17]. Интересным и актуальным представляется исследование оптических свойств РОВ в водных слоях разных частей губы Канда в сравнении с естественно отделяющимися меромиктическими водоемами.

Цель данной работы — изучение спектрально-оптических характеристик РОВ в природной воде из губы Канда Кандалакшского залива Белого моря, а также их сравнение с аналогичными характеристиками РОВ меромиктических водоемов естественного происхождения. Для этого были проведены измерения спектров поглощения света и спектров испускания флуоресценции при разных длинах волн возбуждения в пробах воды, отобранных на разной глубине в трех водоемах, которые находятся на разных стадиях естественной изоляции от Белого моря (в Лагуне на Зеленом мысе, оз. Еловое и Трехцветное) и из двух плесов губы Канда: морского и меромиктического Федосеевского плеса. Кроме того, построены графики зависимости максимума полосы испускания флуоресценции РОВ от длины волны возбуждения и выполнен расчет квантового выхода флуоресценции.

Объекты исследования и характеристики воды

Пробы природной воды из меромиктических водоемов природного происхождения, расположенных на побережье Кандалакшского залива Белого моря, отобраны в сентябре 2022 г. в Лагуне на Зеленом мысе и в оз. Трехцветное и Еловое. В момент отбора проб хемоклин в Лагуне на Зеленом мысе занимал слой 4.5–5.5 м. Пробы воды в Лагуне на Зеленом мысе отбирали с горизонтов: 0, 1, 2, 3, 4, 4.5 м и начиная с 5 до 5.9 м с шагом 0.1 м. В оз. Трехцветное граница аэробной зоны находилась на глубине 2 м, поэтому были выбраны горизонты 0, 1.5, 1.9, 2, 2.2 и 2.5 м. В оз. Еловое граница аэробной зоны располагается на глубине 3 м, для исследования были взяты глубины 0, 1.500, 2.9, 3, 3.1 и 3.3 м. Спектры поглощения и флуоресценции РОВ из этих меромиктических водоемов приведены в работах [18,19]. Гидрохимические характеристики образцов воды из оз. Трехцветное и Еловое: соленость, рН, окислительно-восстановительный потенциал (E_h) и значения квантового выхода флуоресценции при определенной длине волны возбуждения для РОВ из этих образцов приведены в работе [18]. Данные по концентрации растворенного кислорода, E_h , концентрация хлорофилла и бактериохлорофилла в нефилтрованных пробах для разных горизонтов в Лагуне на Зеленом мысе приведены в статье [19].

Морской плес губы Канда и Федосеевский плес имеют разную структуру с точки зрения распределения солености воды по глубине (таблица). В морском плесе большая часть водной толщи представляет собой соленую воду, но возле поверхности есть слой практически пресной воды толщиной менее 1 м. К глубине 1 м соленость резко возрастает до 14–15‰, что всего на 3% меньше солености придонной зоны. Федосеевский плес отделен от морского мелководным порогом [15]. После строительства железнодорожной дамбы в 1916 г. он оказался в полной изоляции от моря. По распределению солености он существенно отличается от морского и имеет двухслойную структуру с пикноклином (скачком плотности воды) на глубине 7–8 м [15]. Под пикноклином на глубине около 11 м величина солености достигает уже 14‰ (для сравнения, в морской части такая величина солености наблюдается уже на глубине 1 м). Линза соленой воды в самом глубоком месте Федосеевского плеса, по всей вероятности, хранится более ста лет [10,13]. В центральной и восточной частях Федосеевского плеса в придонной области присутствует сероводород [10,13,20,21].

Пробы природной воды отбирали в губе Канда в марте 2023 г. Точки отбора в обоих плесах находились над донными понижениями глубиной 14 м. Глубины, с которых производился отбор, температура и соленость воды на этих глубинах представлены в таблице.

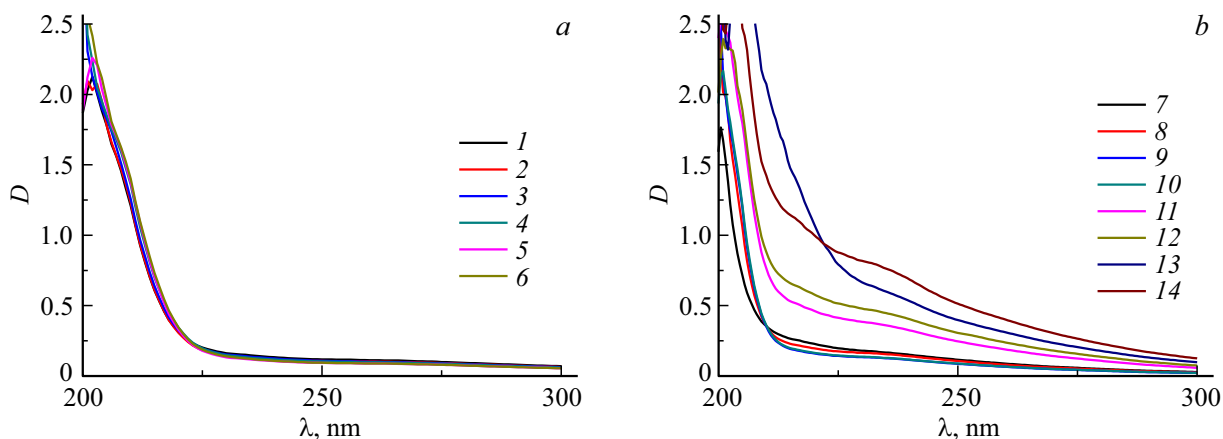


Рис. 1. Спектры поглощения для РОВ в пробах воды из морского плеса губы Канда (а) и из Федосеевского плеса (б) (нумерация проб согласно таблице).

Горизонты отбора проб и физико-химические характеристики воды

Место отбора	Номер пробы	Глубина, m	$T, ^\circ\text{C}$	Соленость, ‰
Морская часть		0.0	-0.23	2.48
губы Канда	1	1.0	+0.32	14.56
67° 07' 49.6" с.ш.;	2	3.0	0.58	15.82
32° 12' 02.0" в.д.	3	5.0	0.30	16.55
	4	8.0	3.13	18.05
	5	11.0	3.87	18.32
	6	13.8	3.77	18.52
Губа Канда		0.0	-0.48	
Федосеевский плес	7	1.0	-0.06	3.3
67° 06' 23.8" с.ш.;	8	3.0	1.85	8.4
32° 10' 31.9" в.д.	9	5.0	2.08	11.0
	10	8.0	1.65	11.6
	11	11.0	4.02	14.7
	12	12.0	5.24	15.6
	13	13.0	5.40	16.1
	14	13.8	5.26	16.6

Методика исследования

Для исследования РОВ перед спектральными измерениями пробы воды были профильтрованы через нейлоновые фильтры с диаметром пор $0.22 \mu\text{m}$. Спектры поглощения РОВ природной воды относительно дистиллированной воды регистрировали на спектрофотометре Solar PB2201 в диапазоне длин волн 200 до 800 nm с шагом сканирования 1 nm. Регистрация спектров проводилась при комнатной температуре. Спектры испускания флуоресценции РОВ измеряли на спектрофлуориметре Solar CM2203 при длинах волн возбуждения флуорес-

ценции λ_{ex} от 250 до 500 nm с шагом 10 nm. Регистрацию спектров флуоресценции проводили в диапазоне от 260–515 до 700 nm (в зависимости от длины волны возбуждения, от 260 до 700 nm при $\lambda_{\text{ex}} = 250 \text{ nm}$ и от 515 до 700 nm при $\lambda_{\text{ex}} = 500 \text{ nm}$) с шагом 1 nm. Диапазоны длин волн возбуждения и регистрации для спектров испускания флуоресценции были выбраны, исходя из известной информации о типичных полосах флуоресценции для гуминовой и белковой составляющей РОВ [7,22]. Размеры входной и выходной щелей монохроматора составляли 5 nm. Для измерения обоих

типов спектров использовали стандартные кварцевые кюветы с длиной оптического пути 1 см. Измеренные спектры флуоресценции были скорректированы с учетом эффекта внутреннего фильтра как $I = I_0 \cdot 10^{(D_{ex} + D_{em})/2}$ (где D_{ex} и D_{em} — оптические плотности на длинах волн возбуждения и регистрации флуоресценции соответственно).

Для характеристики РОВ природной воды в качестве информативных показателей использовали данные из спектров поглощения: оптическую плотность на длинах волн 250, 270 и 280 nm (более длинноволновую область не использовали вследствие малой величины оптической плотности в этом диапазоне в пробах их морской части губы). По максимуму полосы испускания флуоресценции РОВ на полученных спектрах флуоресценции рассчитывали его зависимость от длины волны возбуждения, а также величину так называемого „синего сдвига“ длины волны с целью также сравнить их с аналогичными параметрами для естественных меромиктических водоемов. Еще одной информативной величиной является квантовый выход флуоресценции (КВФ). В случае молекул красителей (и соответственно окрашенного РОВ) КВФ отражает вероятность того, что флуорофор будет излучать свет, возвращаясь в основное состояние после возбуждения светом, и определяется как отношение количества испущенных фотонов к количеству поглощенных фотонов [23]. В состав РОВ природной воды входят как соединения, испускающие флуоресценцию в результате поглощения фотона, так и поглощающие свет, но не флуоресцирующие. Поэтому можно сказать, что большая величина КВФ характерна для РОВ с большим содержанием ароматических групп. Отметим, что природа флуоресценции гуминовых соединений и РОВ природной воды еще не до конца выяснена, поэтому для РОВ, являющегося набором различных органических соединений, КВФ будет корректнее называть кажущимся квантовым выходом флуоресценции [18,24].

КВФ (Φ) рассчитывали для РОВ по спектрам испускания флуоресценции и спектрам поглощения света с использованием эталонных растворов с известным КВФ (см., например, [23,25,26]). В качестве эталонного раствора был взят водный раствор сульфата хинина. Расчеты выполняли по формуле:

$$\Phi = \Phi_{gs} \frac{K}{K_{gs}},$$

где Φ — квантовый выход флуоресценции образца, K и K_{gs} — отношения интегральной по спектру интенсивности флуоресценции к оптической плотности на длине волны возбуждения для образца воды и эталонного раствора соответственно, $\Phi_{gs} = 0.546$ — квантовый выход флуоресценции хинин—сульфата [25].

Результаты и обсуждение

Измеренные спектры поглощения света приведены на рис. 1 (ось ординат соответствует значениям оптической

плотности среды D). Из рисунков видно, что оптическая плотность, начиная с 205–210 nm, уменьшается с ростом длины волны, при этом около 260–270 nm заметно небольшое „плечо“, наличие которого характерно для природной воды [18] и обусловлено присутствием фенольных групп или ароматических аминокислот в составе РОВ. Других пиков поглощения в спектральном диапазоне до 800 nm в образцах РОВ не обнаружено. Аналогичная ситуация наблюдалась в спектрах поглощения света водой из естественных меромиктических водоемов: озер Елового и Трехцветного, Лагуны на Зеленом мысе [18,19]). Значения оптической плотности D , измеренные на длинах волны возбуждения флуоресценции, далее используются для расчета квантового выхода флуоресценции. На рис. 2 представлены графики зависимости оптической плотности воды на длинах волн 250, 270, 280 nm от глубины и солёности. В морском плесе оптическая плотность плавно уменьшается с глубиной при возрастании солёности, что объясняется меньшим содержанием РОВ в морской воде по сравнению с поверхностной, распресненной. В Федосеевском плесе с глубины 11 m начинается анаэробная зона с сероводородом, и на рисунке, начиная именно с этой глубины, виден резкий рост оптической плотности. Оптическая плотность на максимальной глубине 13.8 m превышает величину для глубины 8 m примерно в 6 раз.

На рис. 3 представлены примеры полученных спектров испускания флуоресценции. В исследованном диапазоне длин волн возбуждения (250–700 nm) спектр флуоресценции РОВ состоит из двух перекрывающихся полос: „белковой“ УФ полосы с максимумом в области 300–350 nm (соответствующей белкам или фенольным соединениям) и „гуминовой“ полосы в видимой области спектра с максимумом 400–450 nm (соответствующей гуминовым соединениям). В спектральном отклике РОВ исследованных проб воды также присутствует сигнал комбинационного рассеяния (КР) света молекулами воды в виде небольшого пика на коротких длинах волн (≈ 270 –350 nm), который при увеличении длины волны возбуждения сливается с основной полосой флуоресценции РОВ. В пробах с малых глубин Федосеевского плеса также наблюдается небольшой пик на 330 nm. Вероятно, это следствие оседания микроорганизмов на фильтре, из-за чего осталась полоса свободных аминокислот (тирозин, триптофан) или фрагменты белков с этими аминокислотами. Это может быть связано с активным размножением микроорганизмов в поверхностной воде. Также видно, что флуоресценция по интенсивности в Федосеевском плесе выше, чем в морской части губы. В Федосеевском плесе также заметно увеличение интенсивности флуоресценции с глубиной (различие более чем в 5 раз для глубин 1 m и 13.8 m при длине волны возбуждения 250 nm и более чем в 7 раз при длине волны возбуждения 500 nm). Это свидетельствует о накоплении РОВ в придонной воде.

На рис. 4 приведены результаты расчетов зависимости КВФ РОВ от длины волны возбуждения $\Phi(\lambda_{ex})$

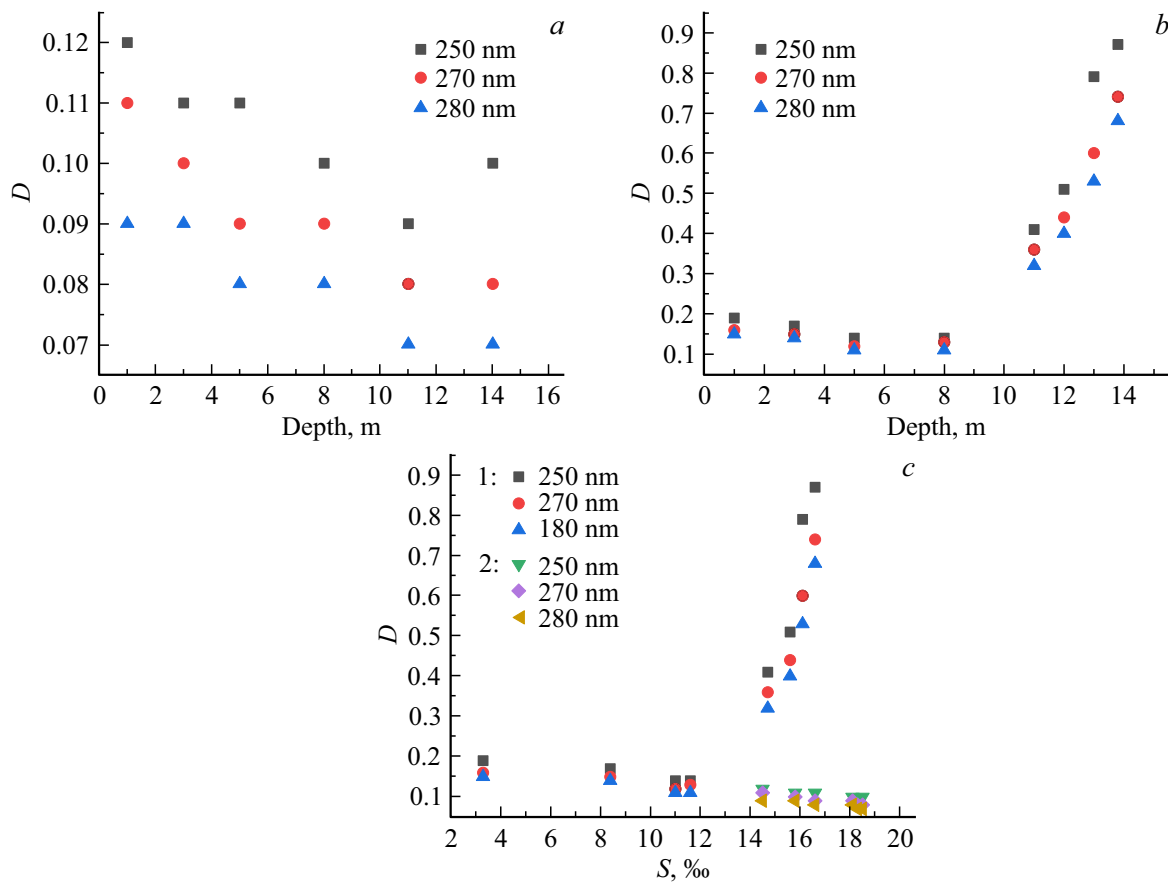


Рис. 2. Зависимость оптической плотности РОВ на длинах волн 250, 270 и 280 nm от глубины в пробах воды из морского плеса (a) и Федосеевского плеса (b) и от солёности для обоих плесов (c) (1 — морской плес, 2 — Федосеевский).

в пробах воды с разной глубины из двух водоемов. (Отметим, что при расчете значений квантовых выходов флуоресценции вклад сигнала КР молекул воды можно считать пренебрежимо малым.) Видно, что КВФ имеет минимум на длине волны возбуждения ≈ 290 nm, а также небольшой „провал“ на $\lambda_{\text{ex}} \approx 360$ nm; максимумы наблюдаются на $\lambda_{\text{ex}} \approx 340$ и 380 nm. Зависимость КВФ от длины волны возбуждения в обоих водоемах имеет качественно сходный характер, при этом абсолютная величина КВФ различается в морском и Федосеевском плесах, а также на разных глубинах одного и того же водоема. КВФ в случае Федосеевского плеса будет ниже, чем в морском, так, в нем присутствует большее количество РОВ терригенного происхождения (с более интенсивной флуоресценцией, но меньшим квантовым выходом). Из работ [5,27] известно, что в прибрежных зонах Северного Ледовитого океана зависимость КВФ РОВ немонотонная: от длины волны возбуждения 250 nm до 270–280 nm она сначала уменьшается, затем по мере увеличения длины волны КВФ растет, образует локальный максимум около 340 nm и достигает максимальных значений при возбуждении светом с длиной волны 370–390 nm, а при еще больших длинах волн значения КВФ уменьшаются. В работах [24, 28–31]

также выявлено наличие двух максимумов КВФ РОВ при возбуждении светом в диапазонах 340–355 nm и 370–400 nm. Для естественных прибрежных меромиктических водоемов беломорского региона зависимость имеет качественно такой же характер и отличается лишь абсолютными величинами КВФ [18,19].

Были построены графики зависимости КВФ на длинах волн 250, 270, 310 и 340 nm от глубины для каждого из двух водоемов (рис. 5). В морском плесе губы Канда КВФ немного увеличивается с глубиной, в то время как в Федосеевском, начиная с 11 м, наоборот, уменьшается. Сравнение с зависимостью КВФ на длине волны 340 nm от глубины в Лагуне на Зеленом мысе (см. [19]) показывает их существенное качественное различие.

По полученным спектрам испускания флуоресценции была рассчитана зависимость длины волны, соответствующей максимуму спектра, λ_{max} , от длины волны возбуждения λ_{ex} . Примеры такой зависимости для четырех выбранных проб (с наименьшей и наибольшей глубины морского и Федосеевского плеса) показаны на рис. 4, b. Зависимость λ_{max} (λ_{ex}) немонотонная: при длине волны возбуждения флуоресценции 250–270 nm λ_{max} возрастает, затем до 310 nm уменьшается. Наблю-

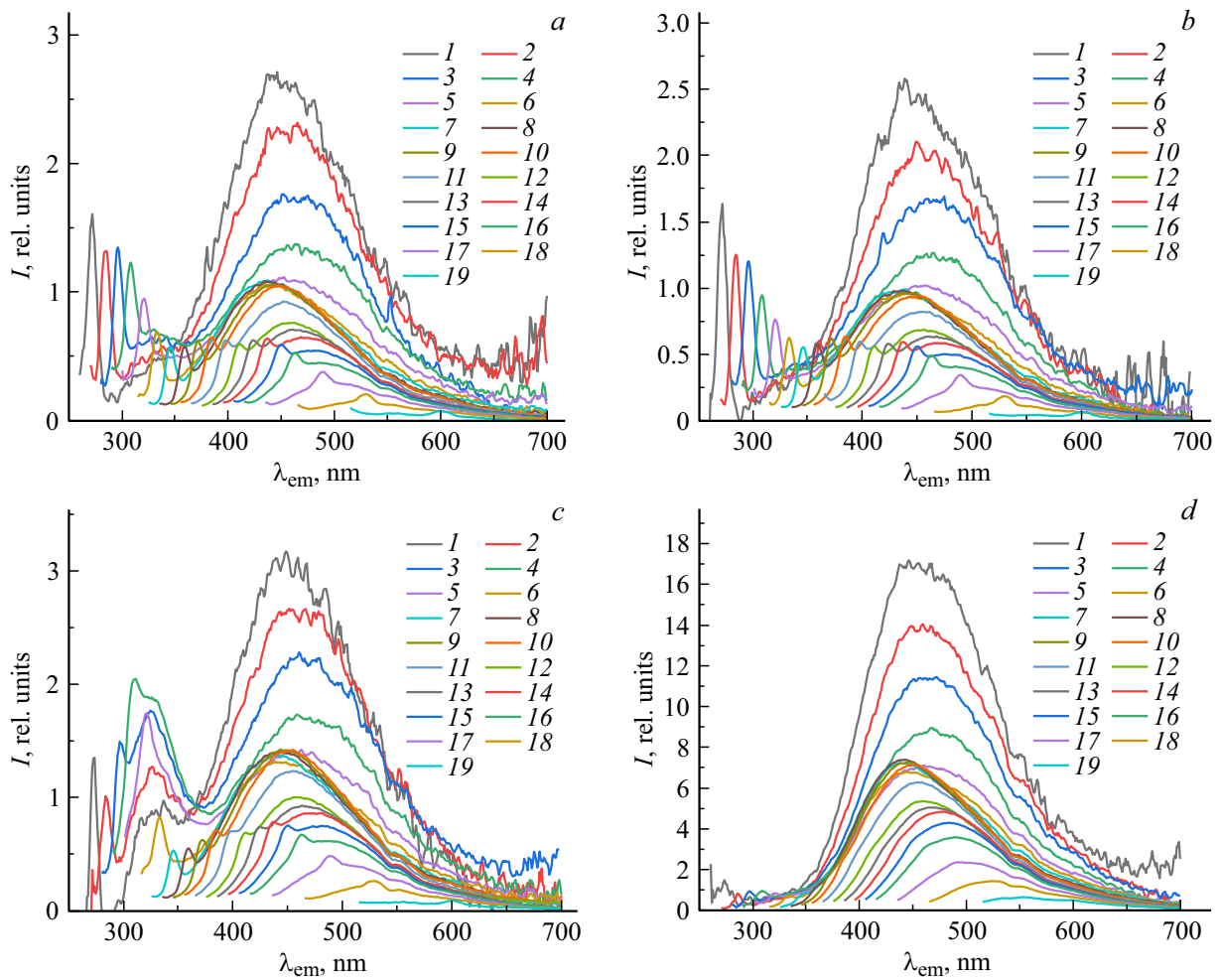


Рис. 3. Спектры испускания флуоресценции для четырех проб: из морского плеса Канда-губы с глубин 1 м (а) и 13.8 м (b), из Федосеевского плеса с глубин 1 м (с) и 13.8 м (d). (Кривые с 1 по 16 соответствуют λ_{ex} 250–400 нм с шагом 10 нм, 17 — 420 нм, 18 — 450 нм, 19 — 500 нм). Приведенные спектры скорректированы с учетом эффекта внутреннего фильтра.

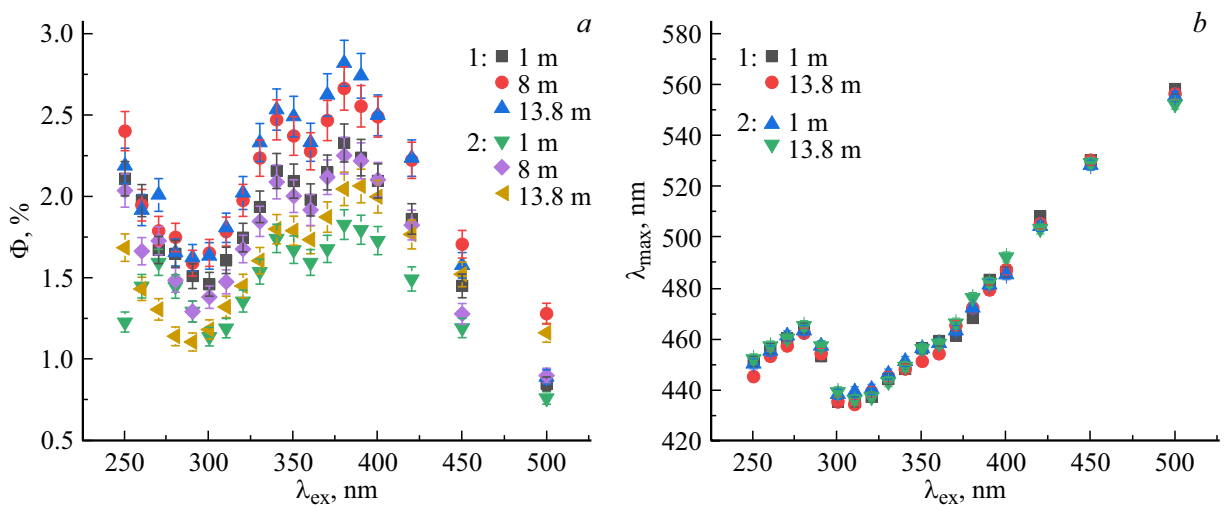


Рис. 4. Зависимость КВФ (а) и длины волны максимума полосы испускания флуоресценции РОВ (b) от длины волны возбуждения, (1 — морской плес, 2 — Федосеевский).

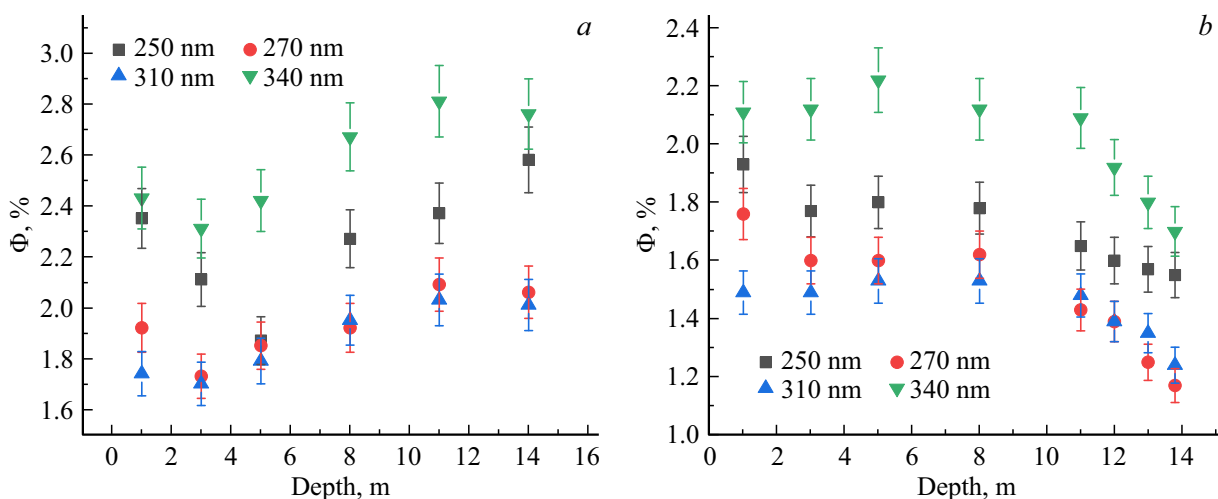


Рис. 5. КВФ при длинах волн возбуждения 250, 270, 310, 340 нм для морского плеса (а) и Федосеевского плеса (b) в зависимости от глубины слоя воды.

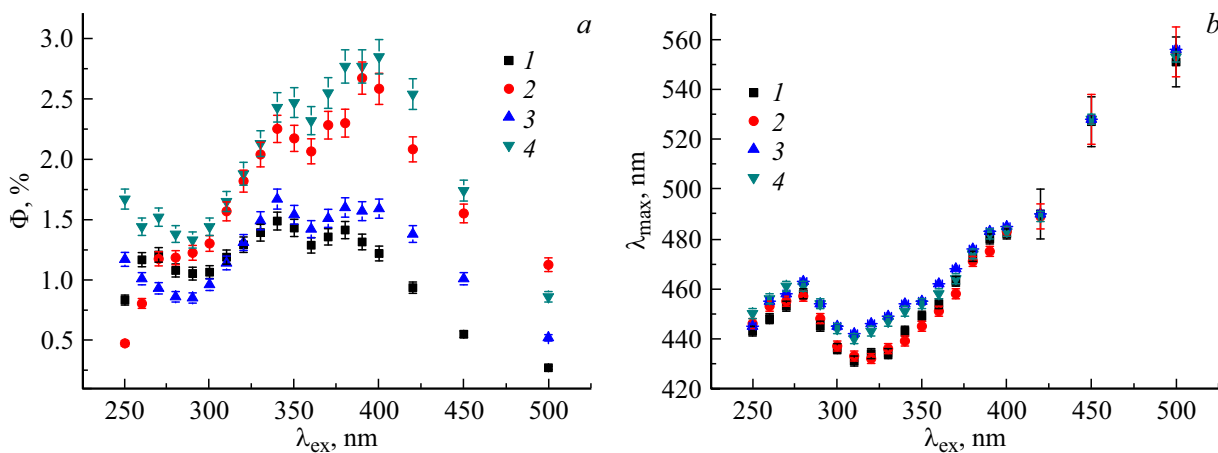


Рис. 6. Зависимость длины волны в максимуме полосы испускания флуоресценции РОВ (а) и КВФ (b) от длины волны возбуждения в естественных меромиктических озерах (1, 2 — Лагуна на Зеленом мысе 1 м и 5.9 м соответственно, 3 — оз. Трехцветное, 1.5 м, 4 — оз. Еловое, 1.5 м).

даемое смещение максимума полосы испускания при изменении длины волны возбуждения от 280 до 310 нм соответствует так называемому „синему сдвигу“, т.е. смещению в коротковолновую сторону. Это характерно для гуминовых соединений, входящих в состав РОВ [5]. При дальнейшем увеличении длины волны возбуждения максимум испускания сдвигается в длинноволновую область в пределах погрешности измерений. Сравнивая рис. 4 и 6, можно отметить, что качественный характер зависимости λ_{\max} (λ_{ex}) в естественных меромиктических водоемах [18,19] не отличается от полученного для губы Канда. Немного различаются лишь величины „синего сдвига“ спектров испускания флуоресценции. Данное явление уже было отмечено ранее в работах [18,32,33] для природных гуминовых веществ морского, речного и почвенного происхождения и свидетельствует о гетерогенности состава флуорофоров РОВ.

Для исследованных проб была рассчитана величина „синего сдвига“, которая представляет собой 2 параметра: $\Delta_1 = \lambda_{\max}(270) - \lambda_{\max}(310)$ и $\Delta_2 = \lambda_{\max}(350) - \lambda_{\max}(310)$. В пробах из морского плеса Канда-губы $\Delta_1 = 24 \pm 4$ нм, $\Delta_2 = 20 \pm 4$ нм, и величина этого сдвига практически не зависит от глубины. В пробах из Федосеевского плеса $\Delta_1 = 23 \pm 4$ нм, $\Delta_2 = 19 \pm 4$ нм, величина также практически не зависит от глубины. Таким образом, в пределах погрешности измерения параметры Δ_1 и Δ_2 в данных двух водоемах не различаются. Для сравнения, в естественных меромиктических водоемах (озера Трехцветное, Еловое, Лагуна на Зеленом мысе) средние величины Δ_1 и Δ_2 немного различаются как с полученными для губы Канда, так и между собой. Также минимальное значение синего сдвига в естественных водоемах меньше (от 12–13 нм).

Заключение

В работе исследованы спектрально-оптические характеристики РОВ природной воды из двух частей губы Канда Белого моря (морского плеса и меромиктического Федосеевского плеса), искусственно отделенной от моря более ста лет назад. Проведено их сравнение с результатами аналогичных исследований для РОВ в меромиктических водоемах естественного происхождения (Лагуна на Зеленом мысе, озера Еловое и Трехцветное). Получены спектры поглощения света, а также графики зависимости оптической плотности воды на длинах волн 250, 270, 280 nm. В морском плесе оптическая плотность плавно уменьшается с глубиной, в Федосеевском плесе оптическая плотность резко возрастает в анаэробной зоне за счет накопления органического вещества.

Получены спектры испускания флуоресценции РОВ и рассчитана зависимость КВФ от длины волны возбуждения в пробах воды с разных глубин из двух водоемов. Интенсивность флуоресценции в Федосеевском плесе выше, чем в морском, что объясняется различным составом РОВ. Зависимость КВФ от длины волны возбуждения в обоих водоемах имеет качественно сходный характер, но различается по абсолютной величине. В Федосеевском плесе КВФ ниже, чем в морской части губы. Для сравнения, в озерах Еловое и Трехцветное и в Лагуне на Зеленом мысе эта зависимость имеет качественно такой же характер, также различаясь абсолютной величиной КВФ. Построена зависимость КВФ от глубины для каждого из двух водоемов на длинах волн 250, 270, 310 и 340 nm. Показано, что в морском плесе КВФ немного увеличивается с глубиной, а в Федосеевском уменьшается, начиная с анаэробной зоны. Проведено сравнение с аналогичной зависимостью КВФ для Лагуны на Зеленом мысе, отмечено их существенное качественное отличие.

Также получены графики зависимости длины волны, соответствующей максимуму спектра флуоресценции, от длины волны возбуждения и рассчитана величина „синего сдвига“. В пределах погрешности измерения параметры Δ_1 и Δ_2 в двух плесах залива Канда практически не различаются, но немного отличаются от значений в оз. Еловое, Трехцветное и Лагуна на Зеленом мысе.

Таким образом, выявлены различия в спектрально-оптических свойствах РОВ двух частей искусственно отделенного меромиктического водоема и естественно отделенных водоемах. Спектры поглощения и флуоресценции показывают различие в составе РОВ, а также различие структуры стратификации водоемов по глубине. Спектрально-оптические характеристики водной толщи морских заливов, естественно или искусственно отделенных от основного морского бассейна, могут служить объективным индикатором трофического (экологического) состояния водоема.

Благодарности

Авторы благодарят администрацию Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова за поддержку экспедиционных работ.

Финансирование работы

Экспедиционные исследования, проведенные в акватории залива Канда, финансировались из средств гранта РНФ № 23-24-00208.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.А. Романкевич, А.А. Ветров, В.И. Пересыпкин. Геология и геофизика, **50** (4), 401 (2009). [E.A. Romankevich, A.A. Vetrov, V.I. Peresypkin. *Rus. Geol. Geophys.*, **50** (4), 291 (2009)].
- [2] Е.А. Романкевич. *Геохимия органического вещества в океане* (Наука, М., 1977).
- [3] Д.И. Глуховец, Ю.А. Гольдин. *Фунд. и прикл. гидрофиз.*, **11** (3), 34 (2018).
- [4] А.И. Лактионов. *Оптика атмосф. и океана*, **18** (11), 983 (2005). [A. I. Laktionov. *Atmosph. Oceanic Opt.*, **18** (11) 886 (2005)].
- [5] А.Н. Дроздова, С.В. Пацаева, Д.А. Хунджуга. *Океанология*, **57** (1), 49 (2017). [A.N. Drozdova, S.V. Patsaeva, D.A. Khundzhua. *Oceanology*, **57** (1), 41 (2017)]. DOI: 10.1134/S0001437017010039
- [6] А.С. Ульяновцев, В.В. Очередник, Е. А. Романкевич. *Докл. Академии наук*, **460** (1), 93 (2015).
- [7] А.Н. Дроздова. *Опт. и спектр.*, **126** (3), 383 (2019). [A.N. Drozdova. *Opt. Spectrosc.*, **126** (3), 303 (2019)]. DOI: 10.1134/S0030400X19030068
- [8] А.Ф. Зайцева, И.В. Конохов, Ю.В. Казимирко, С.И. Погосян. *Океанология*, **58** (2), 251 (2018). [A.F. Zaitseva, I.V. Konyukhov, Y.V. Kazimirko, Pogosyan S.I. *Oceanology*, **58** (2), 233(2018)]. DOI: 10.1134/S0001437018020169
- [9] Д.А. Хунджуга, С.В. Пацаева, О.А. Трубецкой, О.Е. Трубецкая. *Вестн. Моск. ун-та. Серия 3: Физ., астр.*, **1**, 66 (2017). [D.A. Khundzhua, S.V. Patsaeva, O.A. Trubetskoj, O.E. Trubetskaya. *Moscow Univ. Phys. Bull.*, **72** (1), 68 (2017)]. DOI: 10.3103/S0027134907060082
- [10] Е.Д. Краснова. *Водные ресурсы*, **48** (3), 323 (2021). [E.D. Krasnova. *Water Resour.*, **48** (3), 427(2021)]. DOI: 10.1134/S009780782103009X
- [11] Е.Д. Краснова, М.В. Мардашова. *Природа*, **1**, 16 (2020). DOI: 10.7868/S0032874X20010020
- [12] А.А. Жильцова, О.А. Филиппова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронцов, С.В. Пацаева. *Опт. и спектр.*, **131** (6), 817 (2023). DOI: 10.21883/OS.2023.06.55916.108-23
- [13] А.С. Саввичев, Н.А. Демиденко, Е.Д. Краснова, О.А. Калмацкая, А.В. Харчева, М.В. Иванов. *Докл. Академии наук*, **474** (5), 637 (2017). [A.S. Savvichev, N.A. Demidenko, E.D. Krasnova, O.A. Kalmatskaya, A.V. Kharcheva, M.V. Ivanov. *Doklady Biological Sciences*, **474** (1), 135 (2017)]. DOI: 10.1134/S0012496617030103

- [14] Т.С. Смирнова. Гидробиологич. журнал, **1** (4), 27 (1965).
- [15] Н.А. Демиденко, А.С. Саввичев, А.В. Савенко В сб.: *Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология* (КДУ, М., 2018), с. 43–52.
- [16] Н.А. Демиденко, А.С. Саввичев. *География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIII Герценовские чтения* (Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, СПб., 2020), с. 285–290.
- [17] А.С. Саввичев, Н.А. Демиденко, В.В. Кадников, В.В. Беленкова, И.И. Русанов, В.М. Горленко. *Микробиология*, **92** (6), 595 (2023). [A.S. Savvichev, N.A. Demidenko, V.V. Kadnikov, V.V. Belenkova, I.I. Rusanov, V.M. Gorlenko. *Microbiology*, **92** (6) 819 (2023)]. DOI: 10.1134/S002626172360194X
- [18] Ю.Г. Соколовская, А.А. Жильцова, Е.Д. Краснова, Д.А. Воронов, С.В. Пацаева. *Опт. и спектр.*, **131** (6), 872 (2023). DOI: 10.21883/OS.2023.06.55924.111-23
- [19] Yu.G. Sokolovskaya, E.D. Krasnova, D.A. Voronov, D.N. Matorin, A.A. Zhiltsova, S.V. Patsaeva. *Photonics*, **10** (6), 672 (2023). DOI: 10.3390/photonics10060672
- [20] Л.А. Галкина, Л.Е. Позднякова, Т.Я. Цееб. *Океанология*, **3** (5), 898 (1963).
- [21] Л.Б. Друмева, Ю.В. Лупачев, В.П. Лучков, М.В. Маврина. В сб.: *Химия и биология морей*. Под ред. А.И. Симонова (Гос. океаногр. ин-т, Гидрометеиздат, М., 1987), с. 49–53.
- [22] О.А. Трубецкой, О.Е. Трубецкая. *Водные ресурсы*, **46** (4), 428 (2019). [O.A. Trubetskoj, O.E. Trubetskaya. *Water Resour.*, **46** (4), 605 (2019)]. DOI: 10.1134/S0097807819040171
- [23] J.R. Lakowicz. *Principles of Fluorescence Spectroscopy* (Springer, New York, 1986).
- [24] U. Wünsch, K. Murphy, C. Stedmon. *Frontiers in Marine Science*, **2**, 1 (2015). DOI: 10.3389/fmars.2015.00098
- [25] D.F. Eaton. *Pure & Appl. Chem.*, **60** (7), 1107 (1988).
- [26] О.В. Овчинников, М.С. Смирнов, С.В. Асланов. *Опт. и спектр.*, **128** (12), 1926 (2020). [O.V. Ovchinnikov, M.S. Smirnov, S.V. Aslanov. *Opt. Spectrosc.*, **128** (12), 2028 (2020)]. DOI: 10.1134/S0030400X2012098X
- [27] A.N. Drozdova, M.D. Kravchishina, D.A. Khundzhua, M.P. Freidkin, S.V. Patsaeva. *Int. J. Remote Sens.*, **39** (24), 9356 (2018). DOI: 10.1080/01431161.2018.1506187
- [28] S.A. Green, N.V. Blough. *Limnol. Oceanogr.*, **39** (8) 1903 (1994). DOI: 10.4319/lo.1994.39.8.1903
- [29] R. Del Vecchio, N.V. Blough. *Marine Chem.*, **89** (1-4), 169 (2004).
- [30] R. Zepp, W. Sheldon, M. A. Moran. *Marine Chem.*, **89** (1-4), 15(2004). DOI: 10.1016/j.marchem.2004.02.006
- [31] A.A. Andrew, R. Del Vecchio, A. Subramaniam, N.V. Blough. *Mar. Chem.*, **148**, 33 (2013). DOI: 10.1016/j.marchem.2012.11.001
- [32] O. Donard, M. Lamotte, C. Belin, M. Ewald. *Marine Chem.*, **27** (1-2), 117 (1989).
- [33] О.М. Горшкова, С.В. Пацаева, Е.В. Федосеева, Д.М. Шубина, В.И. Южаков. *Вода: химия и экология*, **11**, 31 (2009).