

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ГЛУБИНЕ РАСТВОРЕННОГО
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ФОТОТРОФНЫХ БАКТЕРИЙ В
ЛАГУНЕ НА ЗЕЛЕНОМ МЫСЕ В СЕНТЯБРЕ 2022 ГОДА**

Ю.Г. Соколовская¹, А.А. Жильцова¹, О.А. Филиппова¹, Е.Д. Краснова¹,
Д.А. Воронов², С.В. Пацаева¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, sokolovskaja.julija@physics.msu.ru,
e_d_krasnova@mail.ru; spatsaeva@mail.ru

²Институт проблем передачи информации РАН, г. Москва, da_voronov@mail.ru

**DEPTH DISTRIBUTION OF DISSOLVED ORGANIC MATTER
AND PHOTOTROPHIC BACTERIA IN THE LAGOON
ON THE CAPE ZELENYYI IN SEPTEMBER 2022**

Yu. Sokolovskaya¹, A. Zhiltsova¹, O. Filippova¹, E. Krasnova¹, D. Voronov²,
S. Patsaeva¹

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

²Institute for Information Transmission Problems RAS, Moscow

Аннотация. Экосистема Лагуны на Зеленом мысе относится к значительно отгороженным от моря лагунам с повышенным содержанием органического вещества в осадках. Она отделена от основного бассейна Белого моря мелководным порогом, который полностью перекрывает лагуну при отливе на малой воде. Задачами данной работы было получение с помощью спектральных методов распределения по глубине Лагуны на Зеленом мысе концентрации РОВ и бактериохлорофиллов, характеризующих распределение зеленых серных бактерий – аноксигенных фототрофов, типичных обитателей хемоклина в меромиктических водоемах.

Ключевые слова: прибрежные меромиктические водоемы, морские лагуны, гуминовые вещества, аноксигенные фототрофные бактерии, спектры поглощения, Белое море.

Введение

В Арктической зоне меромиктические водоемы встречаются редко, так как для их образования необходимы определенные условия. Наиболее распространены прибрежные меромиктические водоемы, в которых соленая морская вода перекрыта пресной, поступающей с водосбора. На побережье Белого моря в результате постгляциального поднятия берега образовалось множество водоемов, в разной степени изолированных от Белого моря. В общей сложности выявлено более двух десятков водоемов, еще сохранивших связь с морем. Рассматривая их как последовательные стадии изоляции можно реконструировать ход гидрологической и экологической эволюции водоема.

В меромиктических водоемах с сульфидной аноксией на границе аэробной и анаэробной зон при достаточном проникновении солнечного света образуется окрашенная прослойка воды с массовым развитием фототрофных микроорганизмов. Это могут быть одноклеточные водоросли или аноксигенные фототрофные бактерии, которые окрашивают воду, в зависимости от доминирующего микроорганизма и пигментов, входящих в состав его фотосинтетического аппарата. Изучение вертикального распределения фототрофных микроорганизмов и растворенного органического вещества (РОВ) в меромиктических водоемах позволяет характеризовать водоем и определить его место в процессе эволюции.

Лагуна на Зеленом мысе (общей площадью 17662 м² со средним диаметром 150 м и максимальной глубиной 6,5 м) расположена в 3 км от Беломорской

биологической станции МГУ в Кандалакшском заливе ($66^{\circ}31'49''$ с.ш. и $33^{\circ}05'55''$ в.д.). Она отделена от морской акватории мелководным каменистым порогом, который полностью открывается при отливе и оказывается под водой на максимуме прилива. Благодаря изоляции, в лагуне накапливается осадочное вещество, поступающее из моря и с водосбора, а также органические вещества автохтонного и аллохтонного происхождения, в виде илистого осадка с повышенным содержанием органики. Лагуна на Зеленом мысе обладает очень маленьким водосбором, лишь в 7 раз превышающем площадь водного зеркала, что определяет ее гидрологические особенности [2]. Объем поверхностного стока, поступающего в лагуну, мал, и не приводит к опреснению верхнего слоя. Разница в плотности воды, необходимая для устойчивой стратификации (меромиксии), формируется за счет аккумуляции на дне концентрированного рассола, который образуется при замерзании морской воды. В придонной зоне лагуны постоянно существует сульфидная зона с границей, в разные годы находящейся на глубине 4,0-5,5 м. На этой границе (в хемоклине) в безледный период развивается окрашенное сообщество микроорганизмов, включающее прослойку с цветением одноклеточных водорослей над редокс-переходом и под ним, а в анаэробной части хемоклина – прослойку с аноксигенными фототрофными бактериями [4]. Цветение водорослей чаще всего образовано криптофитовыми жгутиконосцами красного цвета *Rhodomonas* sp. Эти водоросли обладают устойчивостью к сероводороду и в некоторых случаях могут опускаться в сероводородную зону [3]. Аноксигенные фототрофы бывают представлены пурпурными серными бактериями и коричнево-окрашенными серными бактериями [6]. Задачей данной работы было построение распределения по глубине Лагуны на Зеленом мысе концентрации РОВ и бактериохлорофиллов зеленых серных бактерий.

Объекты и методы

Отбор проб производили в сентябре 2022 г. в Лагуне на Зеленом мысе в точке с глубиной 6 м. Для анализа спектрально-люминесцентных свойств воды было отобрано 10 образцов воды с нескольких горизонтов (0 м, 1,0 м, 2,0 м, 3,0 м, 4,0 м, 4,5 м, 5,0 м, 5,1 м, 5,4 м, 5,9 м). Хемоклин в этот момент занимал слой 4,5-5,5 м. Пробы воды отбирали с помощью погружаемого насоса в пластиковые пробирки. Для исследования РОВ перед спектральными измерениями воду фильтровали нейлоновыми фильтрами с размером пор 0,22 мкм для отделения взвешенных частиц. Спектры поглощения измеряли с помощью спектрофотометра Solar PB2201: для нефilterованной воды в кюветах с длиной оптического пути 1 см – с целью получения полос поглощения бактериохлорофилла и определения концентрации пигментов зеленых серных бактерий по методу из работы [1]; для фильтрованной воды в кюветах с длиной оптического пути 3 см – для анализа РОВ на разных горизонтах водоема. Оптические плотности, измеренные в разных кюветах, в дальнейшем приводили к оптической плотности при 1 см. Для фильтрованной воды измеряли также спектры флуоресценции РОВ с помощью спектрофлуориметра Solar CM2203 с возбуждением спектров испускания на разных длинах волн.

Растворенное органическое вещество (РОВ) и соленость воды

Спектры поглощения РОВ приведены на рисунке 1А. Во всех образцах оптическая плотность монотонно убывала с ростом длины волны, что типично для РОВ природной воды [5]. В воде из придонной анаэробной зоны (5,9 м) спектр поглощения света значительно отличался от остальных. Это связано с накоплением РОВ в придонной воде. При изучении спектров поглощения мы обнаружили возрастающую зависимость оптической плотности РОВ в ближнем УФ диапазоне (350 или 380 нм) от глубины и солености воды. Поверхностная вода в Лагуне на Зеленом мысе менее соленая, а на глубине соленость повышается примерно на 2‰. Одновременно увеличивается концентрация РОВ в воде (рис. 1Б).

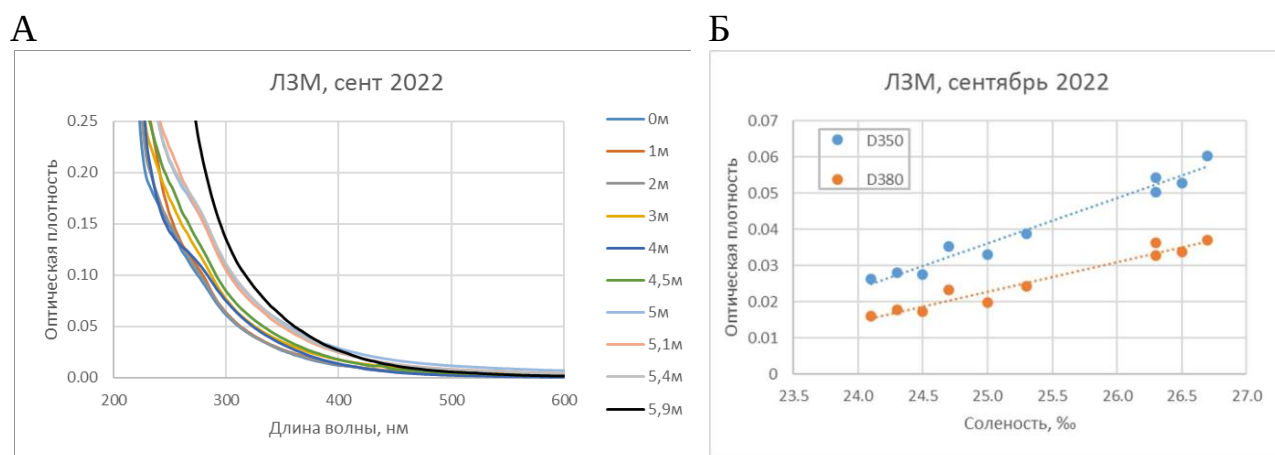


Рис. 1. А – Спектры поглощения РОВ с разных горизонтов (сентябрь 2022 г.).

Б – Зависимость оптической плотности D350 и D380 от солености воды.

Зависимость длины волн максимума спектра $\lambda_{\max}$ от длины волны возбуждения λ_{ex} представлена на рисунке 2. Из рисунка видно, что зависимость имеет немонотонный характер: при длине волны возбуждения 250-270 нм $\lambda_{\max}$ возрастает, далее до 310 нм $\lambda_{\max}$ уменьшается, далее до 310 нм $\lambda_{\max}$ возрастает, далее до 310 нм $\lambda_{\max}$ уменьшается.

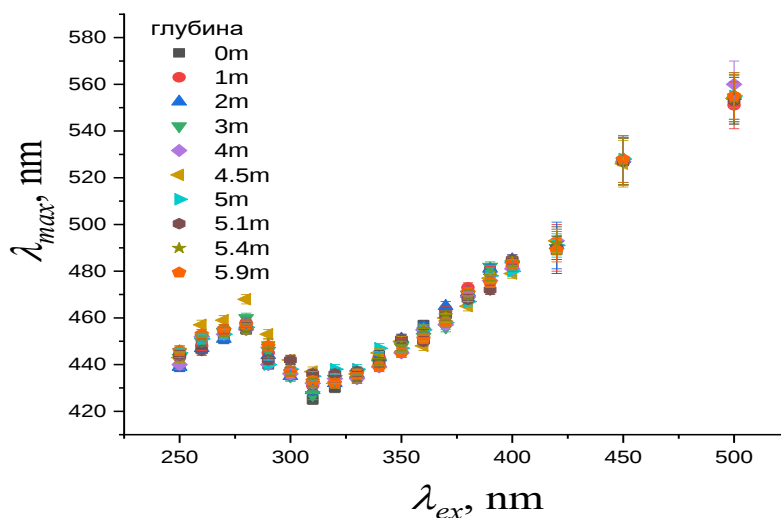


Рис. 2. Зависимость длины волны максимума флуоресценции РОВ от длины волны возбуждения.

Смещение максимума полосы испускания флуоресценции в сторону более коротких длин волн при изменении длины волны возбуждения от 280 до 310 нм соответствует «синему сдвигу», характерному для природных гуминовых соединений [5]. При дальнейшем увеличении длины волны возбуждения максимум испускания сдвигается в длинноволновую область. Тот факт, что зависимость λ_{max} от длины волны возбуждения получилась сходной для разных горизонтов, говорит о том, что ароматическая часть, отвечающая за флуоресценцию РОВ, имеет схожую химическую природу на разных глубинах, однако ближе ко дну наблюдается постепенное накопление РОВ.

Зеленые серные бактерии и концентрация бактериохлорофилла (Бхл)

Рисунок 3 показывает спектры поглощения воды с микроорганизмами на горизонтах ниже хемоклина.

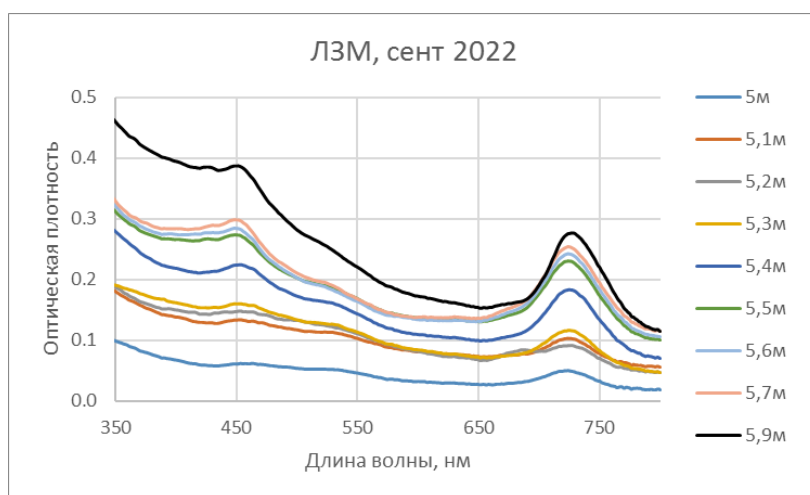


Рис. 3. Спектры поглощения нефильтрованной воды с разных горизонтов ниже хемоклина.

По площади длинноволновой полосы поглощения Бхл в спектральном диапазоне 650...800 нм была определена концентрация Бхл ($d+e$), основных фотосинтетических пигментов зеленых серных бактерий (табл. 1).

Таблица 1. Концентрация Бхл ($d+e$) в Лагуне на Зеленом мысе в сентябре 2022 г.

Глубина, м	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,9
Концентрация Бхл ($d+e$), мг/м ³	477	690	774	1067	1905	2278	2495	2598	2775

Концентрация Бхл ($d+e$) возрастает по направлению ко дну озера, при этом не имеет четко выраженного максимума, что, по всей вероятности, связано с оседанием и накоплением отмерших бактериальных клеток, в которых при этом сохраняются пигменты. Максимальная концентрация Бхл ($d+e$) в придонной воде (2775 мг/м³) превышала примерно в 7 раз концентрацию Бхл в том же водоеме в сентябре 2017 г., приведенную в статье [6] для глубины 6 м.

Заключение

Таким образом, результаты исследований оптической плотности в ближнем УФ диапазоне указывают на существование разных источников РОВ в Ла-

гуне на Зеленом мысе: РОВ морской воды, поступающей в водоем, и автохтонный источник, результат переработки первичной продукции, образованной внутри водоема. Монотонное возрастание оптической плотности РОВ с глубиной, вероятно, отражает распределение живых организмов, которые служат источником РОВ, и накопление продуктов их разложения в анаэробной зоне. Это подтверждается монотонным ростом концентрации Бхл ($d+e$) с глубиной.

Литература

- [1] Емельянцева П.С., Жильцова А.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Рымарь В.В., Пацаева С.В. Определение концентрации хлоросомных бактериохлорофиллов по спектрам поглощения клеток зеленых серных бактерий в пробах природной воды // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2020, № 2. С. 25-30.
- [2] Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. Исследования отделяющихся водоемов на побережье Белого моря // Комплексные исследования Ба-бьего моря, полу-изолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов. Тр. Беломорской биостанции МГУ. Т. 12. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. С. 211-241.
- [2b] Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Маторин Д.Н., Тодоренко Д.А., Белевич Т.А., Милютин И.А., Воронов Д.А. Цветение криптофитовой водоросли *Rhodomonas* sp. (Cryptophyta, Pyrenomonadaceae) в редокс зоне водоемов, отделяющихся от Белого моря // Микробиология. 2014, т. 83, № 3. С. 346-354.
- [2c] Krasnova E., Matorin D., Belevich T., Efimova L., Kharcheva A., Kokryatskaya N., Losyuk G., Todorenko D., Voronov D., Patsaeva S. The characteristic pattern of multiple colored layers in coastal stratified lakes in the process of separation from the White Sea // Chin. J. Oceanol. Limnol. 2018, N 6. P. 1-16.
- [3] Trubetskaya O.E., Richard C., Patsaeva S.V., Trubetskoj O.A. Evaluation of aliphatic/aromatic compounds and fluorophores in dissolved organic matter of contrasting natural waters by SEC-HPLC with multi-wavelength absorbance and fluorescence detections// Spectrochim. Acta - Part A. 2020, v. 238, N5. P.118450-118450.
- [4] Grouzdev D., Gaisin V., Lunina O., et. al. Microbial communities of stratified aquatic ecosystems of Kandalaksha Bay (White Sea) shed light on the evolutionary history of green and brown morphotypes of Chlorobiota, FEMS Microbiology Ecology. 2022, v. 98, Is. 10, fiac103.

S u m m a r y. The ecosystem of the Lagoon on Cape Zelenyi belongs to the lagoons significantly fenced off from the sea with a high content of organic matter in sediments. It is separated from the main basin of the White Sea by a shallow sill, which completely covers the lagoon at low tide. The objectives of this work were to obtain using spectral methods the depth distribution of DOM and bacteriochlorophylls over the of the Lagoon on Cape Zelenyi characterizing the distribution of green sulfur bacteria, anoxygenic phototrophs – typical inhabitants of the chemocline of this meromictic reservoir at the White Sea coast.

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А.И. ГЕРЦЕНА

HERZEN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF RUSSIA

LXXVI Герценовские чтения
География:
развитие науки и образования

Материалы Международной научно-практической конференции
19–21 апреля 2023 года

В 2-х томах

I

LXXVI Herzen readings
Geography:
Development of Science and Education

Materials of the International Scientific and Practical Conference
on April 19–21, 2023

In 2 volumes

Санкт-Петербург
Издательство РГПУ им. А. И. Герцена
2023

УДК 911.5

Рецензенты:

Ал. А. Григорьев, доктор географических наук, профессор, РГПУ им. А. И. Герцена;
Д. В. Севастьянов, доктор географических наук, профессор, ЛГУ им. А. С. Пушкина

Редакционная коллегия:

Д. А. Субетто (отв. ред.), *А. Н. Паранина* (отв. ред.), *А. С. Баранов*, *Ю. Л. Войтеховский*,
Д. А. Гдалин, *Ю. Н. Гладкий*, *И. М. Греков*, *Е. Ю. Гуров*, *С. В. Ильинский*, *В. Ф. Куликов*,
С. И. Махов, *В. Г. Мосин*, *Е. М. Нестеров*, *Л. А. Пестрякова*, *В. Д. Сухоруков*

LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования :
Материалы Международной научно-практической конференции 19–21 апреля
2023 года : в 2 т. Т. I / отв. ред. Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. — Санкт-
Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2023. — 384 с.

LXXVI Gertsenovsky readings. Geography: development of science and education. Materials
of the International Scientific and Practical Conference on April 19–21, 2023 : in 2 vol. Part I / by
ed. D. A. Subetto, A. N. Paranina. — St. Petersburg : Publishing house of Herzen State Pedagogical
University of Russia, 2023. — 384 p.

ISBN 978-5-8064-3368-9

ISBN 978-5-8064-3369-6 (том 1)

Сборник материалов «География: развитие науки и образования» отражает результаты работы научно-практической конференции 76 Герценовские чтения 19–21 апреля 2023 года, посвященной 200-летию со дня рождения К. Д. Ушинского, 160-летию со дня рождения В. И. Вернадского, 140-летию со дня рождения А. Е. Ферсмана.

Материалы сгруппированы в два тома. Том I включает главы: 1. География — основа моделирования мира, 2. Современные вопросы физической географии, 3. Исследования полярных областей, 4. Лимнология и меромиктические озера, 5. Палеолимнологические и палеогеографические исследования. Том II включает главы: 1. Геоэкология и охрана окружающей среды, 2. Социально-экономические системы и географические аспекты глобализации, 3. Развитие географического образования, 4. Регионоведение, краеведение, туризм.

УДК 911.5

Материалы публикуются в авторской редакции

ISBN 978-5-8064-3368-9

ISBN 978-5-8064-3369-6 (1 том)

© РГПУ им. А. И. Герцена, 2023

© Р. В. Паранин, обложка, 2023

Научное издание

LXXVI Герценовские чтения
География: развитие науки и образования

Материалы Международной научно-практической конференции
19–21 апреля 2023 года

В 2-х томах
Том I

LXXVI Gertsenovsky readings
Geography: development of science and education
Materials of the International Scientific and Practical Conference
on April 19–21, 2023

In 2 volumes
Part I

Подготовка оригинал-макета *А. Н. Параниной*
Дизайн обложки *Р. В. Паранина*

Печатается с готового оригинал-макета, в авторской редакции

Подписано в печать 12.05.2023. Формат 60 × 84 ¹/₁₆
Печать цифровая. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 24,0. Тираж 500 экз. Заказ № 000к

Типография РГПУ им. А. И. Герцена
191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48