

ТОНКАЯ СТРУКТУРА БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОЗ. ТРЁХЦВЕТНОМ В МАРТЕ 2019 Г.

А.А. Жильцова*, Д.А. Воронов**, Е.Д. Краснова****,
Е.А. Вахрамеева***, Н.М. Кокрятская***, Г.Н. Лосюк***,
П.С. Емельянцеv*, Д.А. Харитонов*, С.В. Пацаева*

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, a.a.zhiltsova@gmail.com;
spatsaeva@mail.ru

**Ин-т проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН; НИИ физ.-хим. биологии
им. А.Н. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, da_voronov@mail.ru

*** Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика
Н.П. Лаверова РАН, г. Архангельск, glosyuk@yandex.ru, kokr@yandex.ru

**** Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, e_d_krasnova@mail.ru

THIN STRUCTURE OF BACTERIAL PLATE ACCORDING TO THE OPTICAL MEASUREMENTS IN TREKHTZVETNOE LAKE IN MARCH 2019

A.A. Zhiltsova*, D.A. Voronov**, E.D. Krasnova***, E.A. Vakhrameeva***,
N.M. Kokryatskaya***, G.N. Losuyk***, P.S. Emelyancev*, D.A. Kharitonov*,
S.V. Patsaeva*,

*Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences,
Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology of Lomonosov Moscow State University, Moscow

***N. Laverov Federal Center of Integrated Arctic Research, Arkhangelsk

****Department of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Аннотация. Из хемоклина меромиктического оз. Трехцветного (Кандалакшский залив Белого моря) в марте 2019 г. с помощью многотриггера отобраны пробы воды с интервалом 2,5 см по глубине начиная с 2 м. Впервые для прибрежных меромиктических водоемов Беломорского региона измерена концентрация сероводорода в воде с таким разрешением по глубине; на протяжении 30 см она варьировала на два порядка – от 1,2 до 120 мг/л. На основании спектрально-оптических характеристик природной воды и ацетон-метаноловых экстрактов получено распределение по глубине концентрации бактериохлорофилла (Бхл) в клетках бактерий и интенсивности его флуоресценции. Толщина бактериальной пластины, определяемая как разность глубин с половинной концентрацией от максимального значения, составила 7,5 см. Выявлены заметные различия тушения флуоресценции Бхл в верхней и нижней части бактериальной пластины, обусловленные различием в концентрации сероводорода.

Ключевые слова: аноксигенные фототрофные бактерии, зеленые серобактерии, флуоресценция, бактериохлорофилл, сероводород, Белое море.

Введение

Во многих прибрежных меромиктических водоемах, которые образовались в результате отделения от Белого моря, на границе кислородного и сероводородного слоев возникает благоприятное место обитания для аноксигенных фототрофных микроорганизмов. Отличительной чертой изучаемых нами водоемов, расположенных в окрестностях Беломорской биостанции МГУ им. М.В. Ломоносова, является высокая концентрация сероводорода в придонных слоях [8] и наличие в области хемоклина тонкого цветного слоя («бактериальной пластины») с массовым развитием зеленых серных бактерий [5, 6, 7], которые используют при фотосинтезе сероводород, поступающий снизу из анаэроб-

ной водной массы. Первичная продукция аноксигенного фотосинтеза в таких водоемах существенно превышает таковую от оксигенного, выполняемого фитопланктоном в аэробной зоне [1, 4]. Спектральный анализ образцов, содержащих фотосинтетические пигменты бактерий, делает возможным наблюдение за состоянием аноксигенных микроорганизмов и влиянием на них внешних факторов.

Для отбора проб с разной глубины обычно мы используется погружной насос [2, 3], позволяющий отбирать пробы воды с дискретностью по глубине 5-10 см. Однако для изучения вертикального распределения микроорганизмов внутри зоны с наибольшими градиентами численности клеток такое разрешение недостаточно. Поэтому в данной работе была поставлена задача отбора проб из оз. Трехцветного с разрешением по глубине 2,5 см и их последующий анализ.

Объекты и методы

Меромиктическое оз. Трехцветное (66°35,53'N, 32°59,97'E) расположено в Пеккелинской губе, входящей в состав Ругозерской губы Кандалакшского залива Белого моря, в 12 км от Беломорской биологической станции МГУ. Его размеры: площадь – 3,2 га, средняя глубина 1-1,5 м, максимальная глубина 7,5 м. Озеро названо Трехцветным из-за различных по цвету слоев воды: пресный поверхностный слой – бурый за счет гуминовых веществ, средний солоноватый слой – изумрудно-зеленый в результате развития зеленых серобактерий, нижний еще более соленый слой – желтый вследствие присутствия полисульфидов. Озеро образовалось на месте древнего морского залива, отгороженного от моря островом, который в ходе поднятия берега присоединился к материку. Площадь водосборного бассейна в 20 раз превышает площадь самого озера, сток с водосбора собирается вблизи поверхности озера и формирует пресный слой глубиной 1,5-1,7 м [2, 3]. Озеро изолировано от моря; в летнее время уровень воды в нем на 1,20-1,26 м выше уровня моря, зимой абсолютная отметка поверхности льда 1,25 м.

В ходе экспедиции в марте 2019 г. из оз. Трехцветного отобраны пробы воды с интервалом 2,5 см в диапазоне глубин 2,0-2,3 м с помощью оригинального пробоотборника, сконструированного Д.А Вороновым. Пробоотборник состоит из металлической рамы, в которой закреплены 13 шприцов объемом 5 мл таким образом, чтобы входные отверстия находились на расстоянии 2,5 см друг от друга по глубине. Пробоотборник опускается под воду в строго вертикальном положении. Раскрытие шприцов обеспечивается гидравлическим приводом к двум краевым шприцам, к носикам которых прикреплены тонкие трубки, заполненные водой. При надавливании на поршни внешних шприцов давление через трубки передается внутрь цилиндров краевых шприцов пробоотборника, погруженного под воду, что создает усилие для раскрытия пустых шприцов, которые таким образом захватывают воду в 13 шприцов из слоя протяженностью 30 см по глубине. Установка с заполненными шприцами поднимается из воды, носики вынутых из рамы

шприцов немедленно закрываются запаянными крышечками, чтобы сохранить анаэробные условия внутри шприцов.

Определение растворенного сероводорода осуществлялось стандартным фотометрическим методом фотометрическим методом по РД 52.24.450-2010 на фотометре Эксперт 003.

Спектры оптической плотности регистрировали на спектрофотометре Solar PB2201, спектры испускания флуоресценции измеряли с помощью флуориметра Solar CM2203. Для получения экстрактов проб воды с зелеными серными бактериями к 1 мл пробы воды добавляли 4 мл смеси ацетона с метанолом (7:2). Концентрация Бхл *d* (мг/л) рассчитывалась по спектрам поглощения экстрактов, приготовленных из проб воды с разной глубины, по формуле [9].

Обсуждение результатов

Присутствие сероводорода зафиксировано в оз. Трехцветном в марте 2019 г. начиная с глубины 1,9 м. Благодаря отбору проб воды с помощью многوشприцевого пробоотборника и последующему их спектральному анализу изучена тонкая стратификация слоев воды, содержащих зеленые серные бактерии – интенсивность флуоресценции Бхл зеленых серных бактерий, концентрация Бхл в пробах и концентрация сероводорода в воде на различной глубине. Получено, что на протяжении 30 см концентрация сероводорода изменялась на два порядка – от 1,2 до 120 мг/л. Максимальная концентрация Бхл наблюдалась на глубине 2,175 м и была равна 5000 мг/м³. Распределение концентрации пигмента по глубине в окрестностях максимума было почти симметричным. Толщина бактериальной пластины, определяемая как разность глубин с половинной концентрацией от максимального значения, была равна 7,5 см.

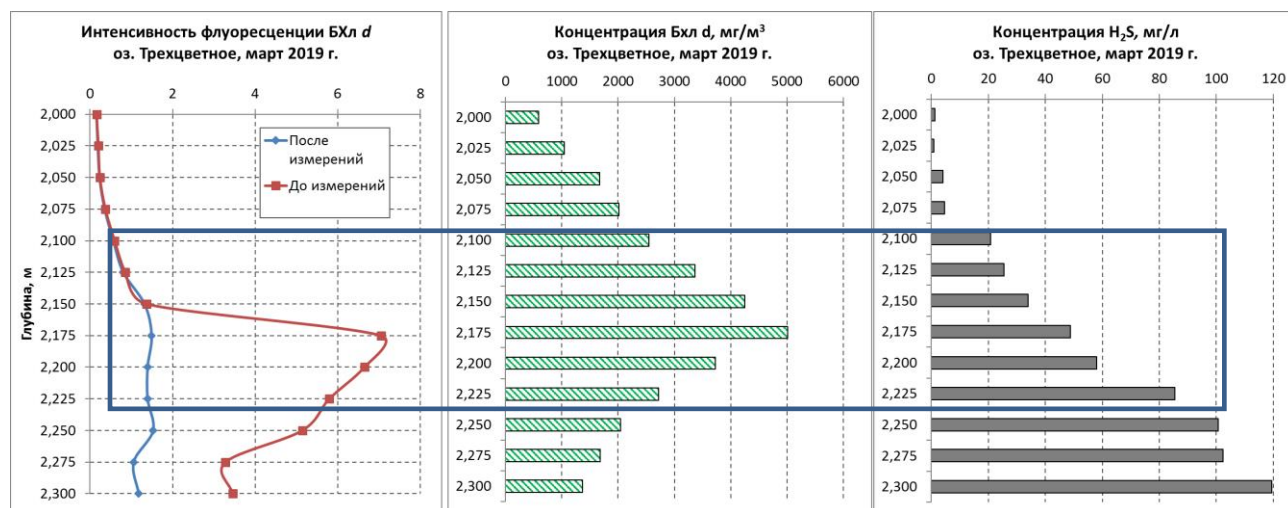


Рис. 1. Профили интенсивности флуоресценции Бхл *d* (до и после облучения пробы), концентрации Бхл *d* и концентрации сероводорода в оз. Трехцветное в марте 2019 г.

В пробах с максимальной концентрацией пигмента интенсивность флуоресценции Бхл в клетках зеленых серобактерий также была максимальной. Однако распределение по глубине интенсивности флуоресценции Бхл разительным образом отличалось от распределения концентрации пигмента: выше слоя с максимумом Бхл наблюдалось тушение флуоресценции Бхл. Ниже слоя с

максимумом Бхл сероводород в концентрации более 50 мг/л служил «консервантом» и тушение флуоресценции Бхл в клетках, предварительно адаптированных к темноте, не наблюдалось.

Спектры испускания флуоресценции при длине волны возбуждающего света 440 нм регистрировали дважды – в начале цикла измерений и после облучения в течение 30 минут (на рисунке 1 соответствующие интенсивности в спектре испускания Бхл обозначены как «до измерений» и «после измерений»). Было отмечено, что после облучения видимым светом образца воды с аноксигенными фототрофными бактериями интенсивность флуоресценции Бхл может заметно уменьшаться. Сильное уменьшение флуоресценции происходит в слое воды с максимальной концентрацией пигмента и прилегающих снизу слоях. Однако над областью с максимальной концентрацией Бхл в воде с концентрацией сероводорода до 40 мг/л заметных различий в интенсивности флуоресценции Бхл до и после облучения не происходит. Такое различие в реакции фотосинтетического аппарата бактерий на облучение видимым светом можно использовать как дополнительный идентификационный признак различного физиологического состояния клеток бактерий в водной среде с различной концентрацией сероводорода.

Выводы

С помощью многошприцевого пробоотборника из оз. Трехцветного в марте 2019 г. отобраны пробы воды с интервалом 2,5 см по глубине. В пробах измерена концентрация сероводорода, впервые с таким разрешением по глубине в отделяющемся от Белого моря водоеме. На основании спектрально-оптических характеристик природной воды и ацетон-метаноловых экстрактов получены распределение по глубине концентрации Бхл аноксигенных бактерий и интенсивности его флуоресценции. Выявлены заметные различия тушения флуоресценции Бхл в верхней и нижней части бактериальной пластины, обусловленные различием в концентрации сероводорода, а также различная реакция фотосинтетического аппарата бактерий на облучение видимым светом, регистрируемая по уровню сигнала флуоресценции Бхл.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ №19-05-00377 и фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Литература

- [1] Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В., Байрамов И.Т., Юсупов С.К., Саввичев А.С., Леин А.Ю., Сапожников В.В. Микробные процессы цикла углерода и серы в озере Могильном. / Микробиология. 2001. Т. 70. № 5. С. 675-686.
- [2] Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М. и др. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря. / Комплексные исследования Бабьего моря, полу-изолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов. Труды Беломорской биостанции МГУ. 2016. Т. 12. М.: Т-во научных изданий КМК. С. 211-241.

- [3] Краснова Е.Д., Демиденко Н.А., Пантюлин А.Н., Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Широкова В.А. Термический и ледовый режимы реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря. / В сб.: Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей труды VIII Международной научно-практической конференции: в 2 томах. – М.: Российский университет дружбы народов, 2014. С. 430-443.
- [4] Саввичев А.С., Лунина О.Н., Русанов И.И., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Иванов М.В. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема в Кандалакшском заливе Белого моря. / Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 191-203.
- [5] Харчева А.В., Жильцова А.А., Лунина О.Н. и др. Флуоресценция бактериохлорофиллов зеленых серных бактерий в анаэробной зоне двух природных водоемов. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. № 4. С. 40-45.
- [6] Kharcheva A.V., Krasnova E.D., Gorlenko V.M., Lunina O.N., Savvichev A.S., Voronov D.A., Zhiltsova A.A., Patsaeva S.V. Depth profiles of spectral and hydrological characteristics of water and their relation to abundances of green sulfur bacteria in the stratified lakes of the White Sea. / Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. 9917:99170Q–1–99170Q–16.
- [7] Krasnova E.D., Kharcheva A.V., Milyutina I.A., Voronov D.A., Patsaeva S.V. Study of microbial communities in redox zone of meromictic lakes isolated from the White Sea using spectral and molecular methods. / Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 2015. Vol. 95. № 8. Pp. 1579-1590.
- [8] Losyuk G., Kokryatskaya N., Krasnova E. Formation of hydrogen sulfide in isolated basins at the Karelian of the White Sea coast. / EARSeL eProceedings. 2015. Vol. 14. Pp. 49-54.
- [9] Overmann J., Tilzer M.M. Control of primary productivity and the significance of photosynthetic bacteria in a meromictic kettle lake Mittlerer Buchensee, West-Germany. / Aquatic Sciences. 1989. Vol. 51. P. 261-278.

S u m m a r y. In March 2019 water samples from the lake Trekhtzvetnoe (Kandalaksha Bay of the White Sea) in were collected using a multi-syringe sampler with an interval of 2.5 cm from the depth of 2 m and lower. The concentration of hydrogen sulfide was measured with such detailed depth resolution for the first time in the separating from the White Sea water bodies; it changed by two orders of magnitude, from 1.2 to 120 mg/l, over 30 cm. Based on the spectral-optical characteristics of natural water and acetone-methanol extracts, the depth distributions of bacteriochlorophyll (BChl) fluorescence intensity and its concentration were obtained. The thickness of the bacterial plate, defined as the difference in depth for the layers with the concentration equals half of the maximum value, was 7.5 cm. Significant differences in quenching of BChl fluorescence in the upper and lower parts of the bacterial plate, caused by differences in the hydrogen sulfide concentration, were revealed.

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А. И. ГЕРЦЕНА
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
НОЦ «ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ»
ИНСТИТУТ ОЗЕРОВЕДЕНИЯ РАН
РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

RUSSIAN STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY OF A.I. HERZEN
FACULTY OF GEOGRAPHY
REC «ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT»
LIMNOLOGY INSTITUTE OF RAS
RUSSIAN GEOGRAPHIC SOCIETY

География: развитие науки и образования

Geography: Development of Science and Education

I

Коллективная монография
по материалам Всероссийской, с международным участием,
научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения
18-21 апреля 2019 года,
посвященной 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова,
135-летию со дня рождения П.В. Гуревича,
90 -летию со дня рождения В.С. Жекулина

Collective monograph
on the materials of annual All-Russian with the international participation,
Scientific-Practical Conference LXXII Herzen readings 18-21 April 2019,
devoted to the 150 anniversary since the birth of V.L. Komarov,
to the 135 anniversary since the birth of P.V. Gurevich,
to the 90 anniversary since the birth of V.S. Zhekulin

Санкт-Петербург
2019

Рецензенты:

Д.В. Севастьянов, Ал.А. Григорьев

Ответственные редакторы:

С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина

Редакционная коллегия:

*Л.Б. Вампилова, Д.А. Гдалин, Ю.Н. Гладкий, С.В. Ильинский, Е.Д. Краснова, В.Ф. Куликов,
С.И. Махов, Л.Г. Мачавариани, В.Г. Мосин, Е.М. Нестеров, Л.А. Пестрякова, В.Д. Сухоруков*

Техническое редактирование:

*А.С. Баранов, М.А. Бахир, В.В. Брылкин, Л.Б. Вампилова, Р.В. Паранин, А.Н. Паранина,
Е.Д. Краснова, В.Ф. Толкачева*

География: развитие науки и образования. Том I. Коллективная монография по материалам ежегодной Всероссийской с международным участием научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения, посвященной 150-летию со дня рождения В.Л. Комарова, 135-летию со дня рождения П.В. Гуревича, 90-летию со дня рождения В.С. Жекулина, Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 18-21 апреля 2019 года / Отв. ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. – СПб.: Изд-во Астерион, 2019. – с. 547.

Geography: development of science and education. Part I. Collective monograph on materials of the annual All-Russian with the international participation, scientific and practical conference LXXII Gertsenovskiy readings, devoted to the 150 anniversary since the birth of V.L. Komarov, to the 135 anniversary since the birth of P.V. Gurevich, to the 90 anniversary since the birth of V.S. Zhekulin. St. Petersburg, RSPU of A.I. Herzen, on April 18-21, 2019 / by edition S.I. Bogdanov, D.A. Subetto, A.N. Paranina. – St. Petersburg: Asterion, 2019. – с. 547.

Коллективная монография «География: развитие науки и образования» представляет новые результаты развития географии и географического образования в России и других странах. Монография отражает основные направления работы ежегодной научно-практической конференции Герценовские чтения, проведенной на факультете географии РГПУ им. А.И. Герцена 18-21 апреля 2019 г. Монография адресуется представителям географической науки и образования, специалистам в области географии, смежных естественных и гуманитарных наук. Материалы сгруппированы в два тома. Том I включает вступительную главу и разделы: 1. физическая география: направления, методы и междисциплинарные исследования; 2. полярные исследования и пути освоения Арктики; 3. исследования меромиктических озёр России; 4. современные проблемы теоретической и прикладной лимнологии и гидрологии; 5. эволюционная и историческая география, ритмика процессов и явлений. Том II включает разделы: 1. геоэкология, природопользование и охрана окружающей среды; 2. социально-экономические системы и географические аспекты глобализации; 3. развитие географического образования; 4. регионоведение, краеведение, туризм, природное и культурное наследие.

Материалы публикуются в авторской редакции

978-5-00045-696-5

978-5-00045-697-2

© Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2019

© Институт озероведения РАН, 2019

© РГО, 2019

© Авторы статей, 2019