



ТРУДЫ
VI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
**«МОРСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ОБРАЗОВАНИЕ:
MARESEDU-2017»**
30 октября - 2 ноября 2017 г.

УДК [551.46+574.5](063)

ББК 26.221я431+26.38я431+28.082.40я431

T78

Труды VI Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)”: [сборник]. - Тверь: ООО "ПолиПРЕСС", 2017. - 742 с.: ил., карты, схемы. ISBN 978-5-9500750-8-7

Сборник «Труды VI Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)”» представляет собой книгу тезисов докладов участников конференции. Сборник состоит из глав, соответствующих секциям технической программы конференции: общая (пленарная), океанология, геофизические исследования на акваториях, морская геология, морская биология, рациональное природопользование, гидрология, англоязычная секция Marine Geology. Все тезисы представлены в редакции авторов.

В рамках конференции участники обсудили состояние и перспективы развития комплексных исследований Мирового океана, актуальные проблемы природопользования и сохранения биоразнообразия в водных пространствах, освоение ресурсов континентального шельфа, достижения науки и современные методы исследований акваторий, концепции и подходы в обучении морским наукам, традиционно широко были представлены самые свежие результаты научно-исследовательских морских экспедиций. Отличительная черта конференции и сборника - комплексность обсуждаемых исследований и значительное количество докладов, авторами которых были студенты различных вузов страны, принявшие активное участие в работе форума.

Подготовлено к выпуску издательством ООО "ПолиПРЕСС" по заказу ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

ООО "ПолиПРЕСС".
170026, Россия, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д.7
polypress@yandex.ru

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».
Свидетельство о внесении записи в ЕГРЮЛ 77 № 017538482
от 19 июня 2014г.
119234. Москва, Ленинские горы, Научный парк МГУ, владение 1, стр. 77
(495) 930-85-52/ 930-80-58

Все права на издание принадлежат ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

© ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова»

© ООО "ПолиПРЕСС"

Вертикальное распределение параметров флуоресценции хлорофилла фитопланктона в беломорских водоемах.

Тодоренко Дарья Алексеевна¹, Краснова Елена Дмитриевна¹, Воронов Дмитрий Анатольевич^{2,3}, Белевич Татьяна Алексеевна¹, Маторин Дмитрий Николаевич¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет*

² *Институт физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова*

³ *Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, г. Москва*

Введение

Исследованные водоемы находятся на разных стадиях изолированности от Белого моря [Краснова и др., 2013; 2016]. Среди них выделяют водоемы, в которых прослеживается связь с морем (лагуна на Зеленом мысе), частично изолированные (озера Кисло-сладкое и Нижнее Ершовское) и полностью изолированные (озера Еловое и Трехцветное). Все пять водоемов характеризуются неравномерным распределением фотосинтезирующих организмов, которые концентрируются возле редокс-зоны (хемоклина) [Краснова и др., 2014]. Начиная с 2013 г., наряду с регистрацией физико-химических характеристик, в них проводится изучение световых реакций фотосинтеза фитопланктона с использованием метода быстрых индукционных кривых, регистрируемых в миллисекундном временном интервале. В данной работе мы обобщили результаты исследований параметров флуоресценции фотосинтеза в разных слоях воды пяти вышеуказанных водоемов, выполненные в конце лета в 2013, 2014, 2015 и 2017 гг.

Методы исследования

Регистрацию флуоресценции фитопланктона проводили на флуориметре Aquarapen-C 100 (PhotonSystemInstruments, Brno, Чехия). Перед измерениями образцы с фитопланктоном адаптировали к темноте для окисления переносчиков. После адаптации регистрировали индукционные кривые быстрой флуоресценции в течение 2 с, возбуждая флуоресценцию светом с длиной волны 455 нм и интенсивностью $1000 \text{ мкмоль квантов} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Сигнал флуоресценции хлорофилла детектировался PIN-фотодиодом со светофильтром (667 – 750 нм) и максимальной чувствительностью в диапазоне флуоресценции хлорофилла *a*. Измерение флуоресценции было скорректировано на присутствие растворенной органики, имеющей высокое фоновое свечение при возбуждении синим светом. Поправки на флуоресценцию растворенной органики вводили путем вычитания из полученных результатов значений флуоресценции воды, отфильтрованной через нуклеопоровый фильтр ($\phi \text{ пор} = 0.2 \text{ мкм}$).

Индукционная кривая флуоресценции представляет изменение эмиссии флуоресценции хлорофилла после начала освещения и отражает постепенное восстановление переносчиков в электрон-транспортной цепи фотосинтеза. Типичная индукционная кривая быстрой флуоресценции, получаемая при данном способе измерений, характеризуется кинетикой O-J-I-P. Увеличение сигнала флуоресценции во время перехода O-J отражает постепенную редукцию хинонного акцептора Q_A^- как в Q_B -восстанавливающих, так и в Q_B -невосстанавливающих центрах фотосистемы 2 (далее ФС2). Дальнейший рост флуоресценции во время фазы J-I-P связан с полным восстановлением пула пластохинонов и

постепенной редукцией первичных акцепторов ФС1. Индукционные кривые анализировали с помощью JIP-теста, который позволяет лучше понять взаимосвязь между структурой и функцией фотосинтетического аппарата, и быстро оценивать функциональное состояние фотосинтезирующего организма [Strasser et al., 2004].

По параметру флуоресценции F_0 оценивали относительное обилие фитопланктона. Величина F_0 пропорциональна суммарному свето-собирающему комплексу фитопланктона, содержащегося в единице объема воды, и после калибровки коррелирует с содержанием хлорофилла a в клетке [Matorin et al., 2004].

Фотохимическую активность фитопланктона определяли по параметру $\frac{F_V}{F_M} = \frac{(F_M - F_0)}{F_M} = \varphi_{Po}$.

Для оценки электронного транспорта использовали параметр $\varphi_{Eo} = (1 - \frac{F_0}{F_M})(1 - V_J)$, где параметр

$V_J = \frac{(F_J - F_0)}{F_V}$ – относительная амплитуда О- J фазы, является мерой доли Q_B -

невосстанавливаемых центров в ФС2. Долю активных реакционных центров (РЦ) оценивали по параметру $\frac{ABS}{RC} = M_0 \cdot \frac{1}{V_J} \cdot \frac{1}{\varphi_{Po}}$, а тепловую диссипацию энергии как $\frac{Dlo}{RC} = \frac{ABS}{RC} - M_0 \cdot \frac{1}{V_J}$, где

параметр $M_0 = \frac{4(F_{300ms} - F_0)}{F_V}$ – начальный наклон индукционной кривой флуоресценции. Индекс

производительности $PI_{ABS} = \frac{RC}{ABS} \cdot \frac{\varphi_{Po}}{1 - \varphi_{Po}} \cdot \frac{1 - V_J}{V_J}$ использовали для характеристики функционального

состояния ФС2 [Strasser et al., 2004].

Результаты

Исследованные водоемы характеризуются устойчивой плотностной стратификацией с верхним аэробным слоем, нижним анаэробным слоем и узким слоем хемоклина между ними. В 2013 г. в аэробном слое воды исследуемых водоемов величины параметров F_0 и F_V/F_M днем в ясную погоду были низкими. Обилие фитопланктона было низким по сравнению с обилием фитопланктона, обнаруженным возле верхней границы хемоклина. Значения параметра F_V/F_M были в диапазоне от 0.2 до 0.4. По мере продвижения вглубь водоемов происходил рост величин F_0 и F_V/F_M . Наибольшее обилие фитопланктона и высокое функциональное состояние фотосинтетического аппарата водорослей было обнаружено в узком слое у верхней границы хемоклина, где значения параметра F_V/F_M варьировали от 0.53 до 0.72, что соответствует высокой активности фитопланктона [Маторин, Рубин, 2012]. В 2014 г. вертикальные профили параметров флуоресценции были аналогичными. В поверхностном слое воды значения параметров F_0 и F_V/F_M также были низкими и согласовывались с данными, полученными в 2013 г. Высокие значения активности фитопланктона по параметру F_V/F_M зафиксированы в зоне хемоклина. Значения параметра F_V/F_M варьировали от 0.5 до 0.77 и зависели от доминирующего вида. В лагуне на Зеленом мысе на глубине 4.9 м и оз. Кисло-Сладком на глубине 2.2 м доминировали криптофитовые жгутиконосцы *Rhodomonas* sp., в слое их обитания значения F_V/F_M составили 0.7 и 0.76, соответственно. В оз. Нижнем Ершовском доминировали криптофитовые водоросли рода *Cryptomonas* на глубине 2.4 м со значением $F_V/F_M = 0.77$. В озерах Трехцветное и Еловое возле верхней границы слоя хемоклина доминировали *Euglena* sp. и жгутиковые зеленые водоросли, не идентифицированные до вида, для которых значения параметра F_V/F_M составили 0.52 и 0.55, соответственно. В 2015 г. вертикальные профили распределения

параметров F_0 и F_V/F_M в лагуне на Зеленом мысе и озерах Кисло-сладком и Трехцветном согласовывались с профилями, полученными для этих водоемов в 2013 и 2014 гг.; максимальные значения параметров F_0 и F_V/F_M также были зарегистрированы в зоне хемоклина. В лагуне на Зеленом мысе наибольшее значение параметра F_V/F_M зарегистрировано на глубине 4.4 м. Величина параметра F_V/F_M составила 0.73. В оз. Кисло-Сладком высокое обилие и активность фитопланктона обнаружены на глубине 1.2 м со значением $F_V/F_M = 0.74$, а в оз. Трехцветном, как и в предыдущие года исследований – на глубине 1.7 м со значением $F_V/F_M = 0.55$. В оз. Ершовское вертикальная стратификация вод была частично разрушена: исчез придонный соленый слой и отсутствовал слой хемоклина, это было вызвано большим поступлением в водоем пресной воды с водосборного бассейна в результате обильных осадков. В 2017 г. в исследуемых водоемах пик по параметрам F_0 и F_V/F_M , характерный для зоны хемоклина, не был обнаружен. Вероятно, это было вызвано тем, что пик цветения фитопланктона в зоне хемоклина из-за позднего наступления лета пришелся на более поздний период.

Нами были выявлены некоторые особенности в функциональном состоянии фотосинтетического аппарата фитопланктона, обитающего в зоне хемоклина, по параметрам флуоресценции. На рисунке представлены вертикальные профили распределения индекса производительности ФС2 (PI_{ABS}), доли активных РЦ (ABS/RC), эффективности электронного транспорта (Φ_{Eo}) и тепловой диссипации энергии (Dio/RC) в водоемах, полученные в 2014 г.

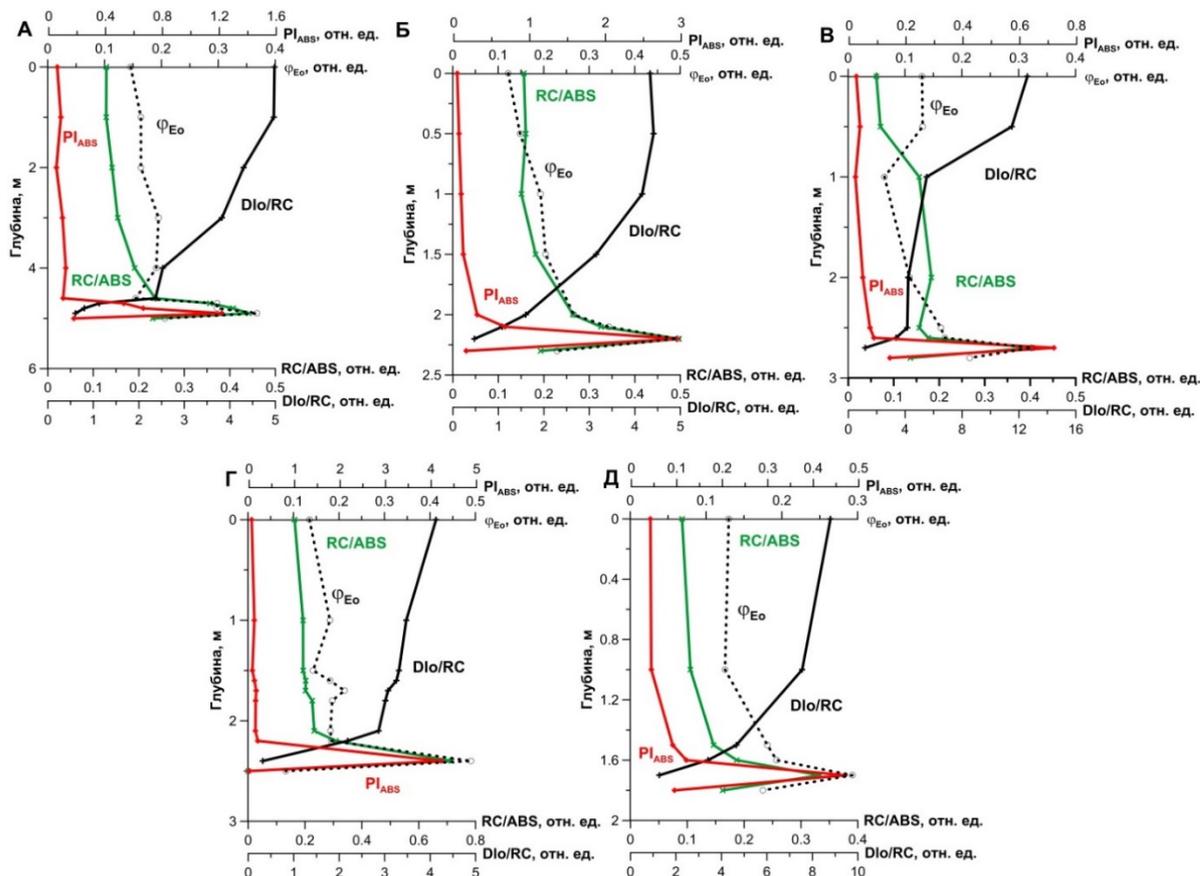


Рисунок. Вертикальное распределение параметров флуоресценции, где Φ_{Eo} – квантовая эффективность переноса электронов от Q_A^- (т.е. квантовый выход электронного транспорта), PI_{ABS} – показатель функциональной активности ФС2, RC/ABS – показатель эффективности, выражаемый как концентрация РЦ в общем пуле хлорофиллов (обратный величине ABS/RC), Dio/RC – общее количество энергии, рассеиваемой одним РЦ в виде тепла. А – лагуна на Зеленом мысе; Б – оз. Кисло-Сладкое; В – оз. Еловое; Г – оз. Нижнее Ершовское; Д – оз. Трехцветное.

Фитопланктон, обитающий в зоне хемоклина, характеризовался высокими показателями фотосинтетической активности и низким рассеиванием энергии в виде тепла (D_{lo}/RC) по сравнению с фитопланктоном из вышележащих горизонтов воды. КRYPTOФИТОВЫЕ водоросли, обнаруженные в зоне хемоклина в лагуне на Зеленом мысе и в озерах Кисло-Сладкое и Нижнее Ершовское, обладали особенно высокой функциональной активностью ФС2 (PI_{ABS}), выраженной через высокую долю активных РЦ (ABS/RC), высокий квантовый выход первичной фотохимической реакции в ФС2 (F_V/F_M) и скорость электронного транспорта (ϕ_{E_0}). В озерах Еловое и Трехцветное возле верхней границы слоя хемоклина, где доминировали зеленые и эвгленовые водоросли фотосинтетическая активность была ниже, чем в аналогичном слое водоемов с криптофитовыми водорослями, а также ниже таковых, регистрируемых на экспоненциальной стадии роста в культурах зеленых водорослей.

Заключение

В пяти меромиктических водоемах Белого моря были получены вертикальные профили распределения параметров флуоресценции фитопланктона. Полученные профили показали, что наибольшее обилие фитопланктона и высокое функциональное состояние фотосинтетического аппарата водорослей достигается в узком слое у верхней границы хемоклина. Оно сопоставимо с аналогичными характеристиками культур водорослей, выращиваемых в оптимальных условиях. При этом, в случае доминирования криптофитовых водорослей (*Rhodomonas* sp. и *Cryptomonas* sp.) значения квантового выхода фотохимии ФС2 (F_V/F_M), доли активных РЦ (ABS/RC) и квантовый выход электронного транспорта в ФС2 (ϕ_{E_0}) были выше, чем при доминировании зеленых и эвгленовых водорослей.

Список литературы

Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Кокрятская Н.М., Пантюлин А.Н., Рогатых Т.А., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря. Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота — изменения на фоне трансгрессии берегов // М.: Т-во научных изданий КМК, Труды Беломорской биостанции МГУ – 2016. – Т.12. – С. 211–241.

Краснова Е.Д., Пантюлин А.Н., Белевич Т.А., Воронов Д.А., Демиденко Н.А., Житина Л.С., Ильяш Л.В., Кокрятская Н.М., Лунина О.Н., Мардашова М.В., Прудковский А.А., Саввичев А.С., Филиппов А.С., Шевченко В.П. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от Белого моря в марте 2012 г. // Океанология. – 2013. – Т.53. – №5. – С. 714–717.

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*, *Rylenomonadaceae*) в редокс-зоне водоемов, отделяющихся от Белого моря // Микробиология. – 2014. – Т.83. – №3. – С. 346–354.

Маторин Д.Н., Рубин А.Б. Флуоресценция хлорофилла высших растений и водорослей // Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2012. – 256 с.

Matorin D.N., Antal T.K., Ostrowska M., Rubin A.B., Ficek D., Majchrowski R. Chlorophyll fluorimetry as a method for studying light absorption by photosynthetic pigments in marine algae // Oceanologia. – 2004. – Vol. 46, No.4. – P.519–531.

Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient. In: Advances in Photosynthesis and Respiration. Chlorophyll *a* Fluorescence: a Signature of Photosynthesis / In: G. Papageorgiou, Govindjee (Ed.). – The Netherlands: Springer, 2004. – P. 321–362.