

Влияние случаев цветения кокколитофорид на биооптические характеристики вод Черного моря по данным наблюдений в 2012 и 2017 годах

Е. Н. Корчемкина^{1*}, Е. В. Маньковская¹, Р. И. Ли²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

Поступила 03.07.2020 г.; принята к публикации 10.08.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

Цель работы – представить и обсудить результаты оптических и биологических измерений, проводившихся в период цветения кокколитофорид. Используются данные натурных измерений со стационарной океанографической платформы (район Южного берега Крыма, 44° 23' с. ш., 33° 59' в. д.) в июле 2012 г. (7–16 июля) и в мае 2017 г. (24–31 мая) и данные, полученные в экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» по северной части Черного моря в июне 2017 г. (14–30 июня). Эти периоды наблюдений совпали с периодами интенсивного развития кокколитофорид. Рассмотрены и проанализированы результаты измерения глубины видимости белого диска, показателя ослабления направленного света и спектрального коэффициента яркости, а также биологические определения численности клеток кокколитофорид в пробах воды. Помимо натурных данных использовалась спутниковая информация о коэффициенте яркости моря и показателе рассеяния назад. Значения показателя ослабления света, коэффициента яркости, показателя рассеяния назад и биологические определения концентрации кокколитофорид повышены по сравнению с периодами отсутствия цветения. Глубина видимости белого диска имела аномально низкие значения. Численность клеток кокколитофорид, по биологическим данным, изменялась в диапазоне от 150 тыс. кл./л до 1.7 млн кл./л и в среднем составила 0.6 ± 0.4 млн кл./л. По этим данным, оценка концентрации сброшенных кокколитов составила $(1.46 \pm 0.42) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Рассчитанные по спутниковым данным концентрации кокколитов в среднем составили: $(1.29 \pm 0.23) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в июле 2012 г., $(1.32 \pm 0.12) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в мае 2017 г. и $(2.37 \pm 0.69) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в июне 2017 г. Во время цветения наблюдалась высокая изменчивость не только оптических свойств, но и биологических, причем взаимосвязь между их пространственным распределением слабая. С оптической точки зрения показателем цветения оказывается численность кокколитов, а не клеток, что может привести к неверному описанию биологической ситуации.

Ключевые слова: Черное море, кокколитофориды, коэффициент яркости, глубина видимости белого диска, показатель ослабления света, показатель рассеяния света назад, концентрация кокколитов.

© Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В., Ли Р. И., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0827-2019-0002, № 0827-2019-0004 и № АААА-А18-118021490093-4.

Для цитирования: Корчемкина Е. Н., Маньковская Е. В., Ли Р. И. Влияние случаев цветения кокколитофорид на биооптические характеристики вод Черного моря по данным наблюдений в 2012 и 2017 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 17–30. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-17-30

Influence of Coccolithophore Blooms on the Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Waters according to Observations in 2012 and 2017

E. N. Korchemkina^{1*}, E. V. Mankovskaya¹, R.I. Lee²

¹*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

²*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

**e-mail: korchemkina@mhi-ras.ru*

Submitted 03.07.2020; revised 10.08.2020; published 25.09.2020

This paper presents and discusses the results of optical and biological measurements performed during the coccolithophore blooms. This study uses data of measurements from a stationary oceanographic platform (near the Southern coast of Crimea, 44°23' N, 33°59' E) in July 2012 (7–16 July) and in May 2017 (24–31 May), and data obtained during the R/V “Professor Vodyanitsky” expedition to the northern part of the Black Sea in June 2017 (14–30 June). Observation periods coincided with intensive blooms of coccolithophore. The measurements of the Secchi disk depth, light beam attenuation coefficient and reflectance coefficient, as well as biological determinations of the coccolithophore cells number in water samples, are considered and analyzed. In addition to field data, satellite information on the sea reflectance and backscattering are used. The beam attenuation coefficient, reflectance coefficient, backscattering coefficient and coccolithophore concentrations were increased as compared with no bloom period. The Secchi disk depth was abnormally low. The number of coccolithophore cells, according to biological data, varied from 150 thousand cells/L to 1.7 million cells/L and averaged 0.6 ± 0.4 million cells/L. According to these data, the estimated concentration of shed coccoliths was $(1.46 \pm 0.42) 10^{11} \text{ m}^{-3}$. The average coccolith concentrations calculated from satellite data were $(1.29 \pm 0.23) 10^{11} \text{ m}^{-3}$ in July 2012, $(1.32 \pm 0.12) 10^{11} \text{ m}^{-3}$ in May 2017, and $(2.37 \pm 0.69) 10^{11} \text{ m}^{-3}$ in June 2017. During blooms, high variability was observed not only in optical properties, but also in biological properties, and the relationship between their spatial distribution was weak. From the optical point of view, the indicator of bloom is the number of coccoliths, not cells, which can lead to an incorrect description of the biological situation.

Keywords: Black Sea, coccolithophore, reflectance coefficient, Secchi disk depth, beam attenuation coefficient, backscattering coefficient, coccolith concentration.

Acknowledgements: the work is performed under state order on topics no. 0827-2019-0002, 0827-2019-0004, and АААА-А18-118021490093-4.

For citation: Korchemkina, E.N., Mankovskaya, E.V. and Lee, R.I., 2020. Influence of Coccolithophore Blooms on the Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Waters according to Observations in 2012 and 2017. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 17–30. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-17-30 (in Russian).

Введение

Изучение цветения кокколитофорид в последние годы приобретает особую значимость. Цветение в различных районах Мирового океана зачастую охватывает сотни тысяч квадратных километров морской поверхности. В Черном море кокколитофориды представлены в основном массовым видом *Emiliania huxleyi*, составляющим 90–99 % общей численности кокколитофорид [1]. Ранее цветение *E. huxleyi* отмечалось редко, однако начиная с 1990 г. на фоне общего изменения биооптических свойств морской воды [2] стали наблюдаться участившиеся случаи массового развития кокколитофорид [1, 3]. Благодаря развитию спутниковых средств наблюдения стало известно, что цветение кокколитофорид в Черном море наблюдается в той или иной степени каждый год с мая по июнь [3–5].

Кокколитофориды *E. huxleyi* представляют собой одноклеточные нанопланктонные водоросли (диаметр клеток 5–20 мкм). На поверхности каждой клетки находятся известковые диски (кокколиты) в количестве ~15 шт. Диаметр кокколитов 1–2 мкм, толщина 0.25 мкм [6]. В процессе жизнедеятельности клетка несколько раз сбрасывает кокколиты, что приводит к многократному возрастанию количества минеральной взвеси в воде и, как следствие, к увеличению рассеяния света и существенному снижению прозрачности воды. Вода приобретает характерный белесый оттенок, по которому цветение кокколитофорид можно обнаружить визуально [7, с. 102].

Цель работы – представить и обсудить результаты оптических и биологических измерений, проводившихся в период цветения кокколитофорид, а также восстановленные концентрации взвешенного вещества (кокколитов).

Аппаратура и данные

Использованы данные натурных измерений со стационарной океанографической платформы в июле 2012 г. (7–16 июля) и в мае 2017 г. (24–31 мая) и данные, полученные в ходе экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» по северной части Черного моря в июне 2017 г. (14–30 июня). Эти периоды наблюдений совпали с периодами интенсивного развития кокколитофорид, причем не только в открытом море, но и в прибрежных водах, что дало возможность изучать явление с платформы. Помимо натурных данных использовалась спутниковая информация о коэффициенте яркости моря и показателе рассеяния назад взвесью.

Стационарная океанографическая платформа находится в районе Южного берега Крыма (пос. Качивели) на расстоянии 600 м от берега (координаты 44° 23' с. ш. 33° 59' в. д.). Из оптических показателей определялись: глубина видимости белого диска, показатель ослабления направленного света, спектральный коэффициент яркости. Глубина видимости белого диска (Z_b , м) определялась стандартным методом¹⁾. Для определения спектрального коэффициента яркости (ρ) использовался спектрофотометр [8]. Показатель ослабления направленного света ($c(\lambda)$, м⁻¹) измерялся в 2012 г. лабораторным автоколлимационным прозрачномером [9] (416; 432; 468; 490; 506;

¹⁾ Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях / [Сост. А. Н. Овсянников, Н. Т. Филатов, И. Ф. Кириллов и др.]. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 725 с.

527; 547; 567; 587; 610; 625; 640; 677 нм), а в 2017 г. – одноканальным прозрачномером [10] (660 нм).

В экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» выполнялись измерения глубины видимости белого диска и показателя ослабления направленного света с помощью 4-канального (460, 520, 590, 625 нм) прозрачномера [11]. На 33 из 130 станций экспедиции были отобраны пробы воды и выполнен лабораторный анализ характеристик фитопланктона, получены его видовой состав, линейные размеры, численность и биомасса. Для определения характеристик фитопланктона пробы воды объемом до 2 л концентрировали с помощью обратной фильтрующей воронки с поровым фильтром 1 мкм [12, 13] до объема 10 мл и фиксировали 1 мл нейтрализованного 40%-ного формалина. Клетки фитопланктона различной плотности и размеров подсчитывали под световым микроскопом ЛОМО Микмед-2 (увеличение 40× – 1500×).

Для восьми дней из периода экспедиции имеются данные *Rrs* (*Remote Sensing Reflectance*) *Level 2* и продуктов их инверсии *Level 3*, полученные при помощи спутниковых сканеров цвета *MODIS Aqua/Terra*. Для семи дней (16, 21, 23, 26, 27, 28, 29 июня 2017 г.) имеются данные с координатами, совпадающими с координатами станций, на которых выполнялись оптические и биологические исследования.

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 показаны статистические характеристики спектрального коэффициента яркости: средний (с СКО), а также минимальный и максимальный спектры, измеренные в июле 2012 г., мае 2017 г. и июне 2017 г. Спектры коэффициента яркости имеют форму, характерную для спектров вод Черного моря, с явно выраженным максимумом на длине волны ~490 нм. Однако значения коэффициента яркости завышены в 3–5 раз по сравнению с характерными (1–2 %) для данного района и периода времени [5], что можно объяснить влиянием интенсивного развития кокколитофорид *Emiliania huxleyi*. Значения в максимуме спектра составили: 3.13–6.60 % в июле 2012 г., 3.60–5.80 % в мае 2017 г. и 2.50–11.80 % в июне 2017 г.; в среднем 4.7, 4.5 и 9.7 % соответственно (таблица).

Средние значения биооптических характеристик

Averaged biooptic characteristics

Параметры / Parametres	Июль 2012, платформа / July 2012, platform	Май 2017, платформа / May 2017, platform	Июнь 2017, экспедиция / June 2017, expedition
$Z_b, \text{ м} / Z_s, \text{ м}$	8 ± 1	6 ± 0	6 ± 3
$c(\lambda), \text{ м}^{-1} / c(\lambda), \text{ м}^{-1}$	$0.88 \pm 0.03 *$	$0.91 \pm 0.04 **$	$0.97 \pm 0.12 ***$
$\rho_{\max}, \%$	4.7 ± 0.9	4.5 ± 0.5	9.7 ± 1.0
$N_{\text{соцс}}, \text{ м}^{-3} / N_{\text{соцс}}, \text{ м}^{-3}$	$(1.29 \pm 0.23) \cdot 10^{11}$	$(1.32 \pm 0.12) \cdot 10^{11}$	$(2.37 \pm 0.69) \cdot 10^{11}$

* $c(667)$.

** $c(660)$.

*** $c(620)$.

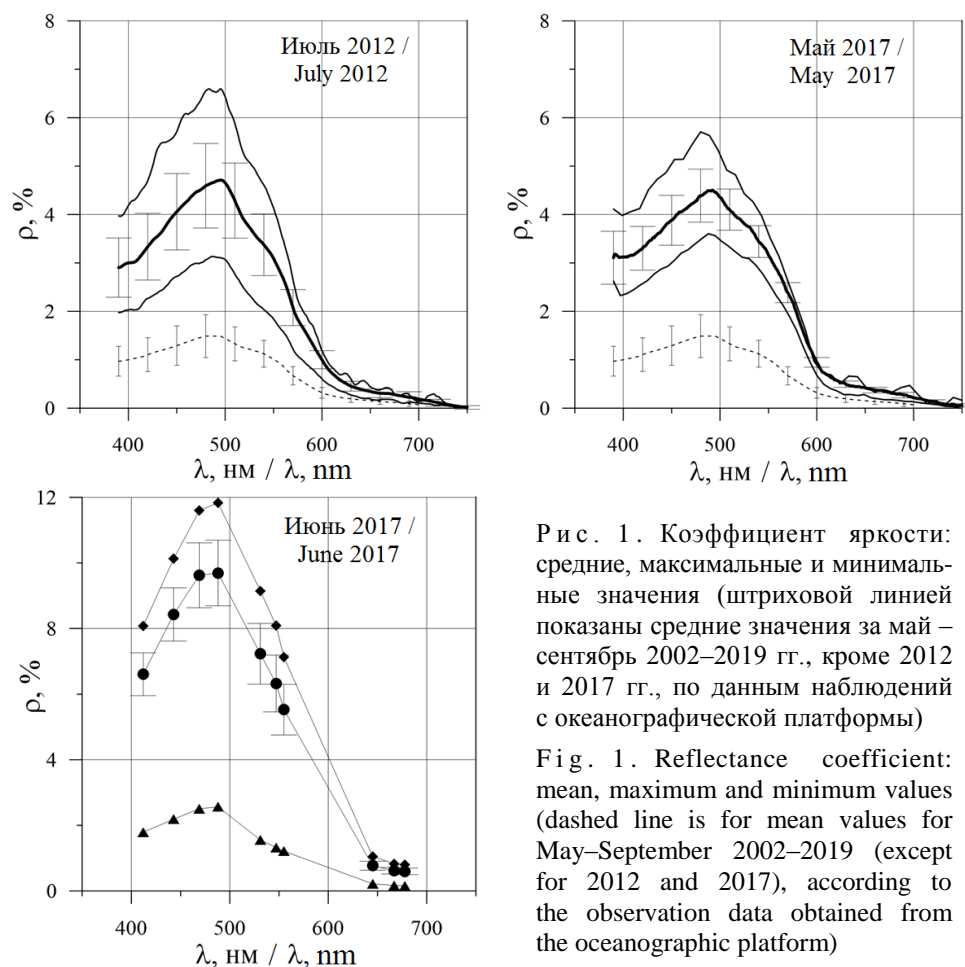


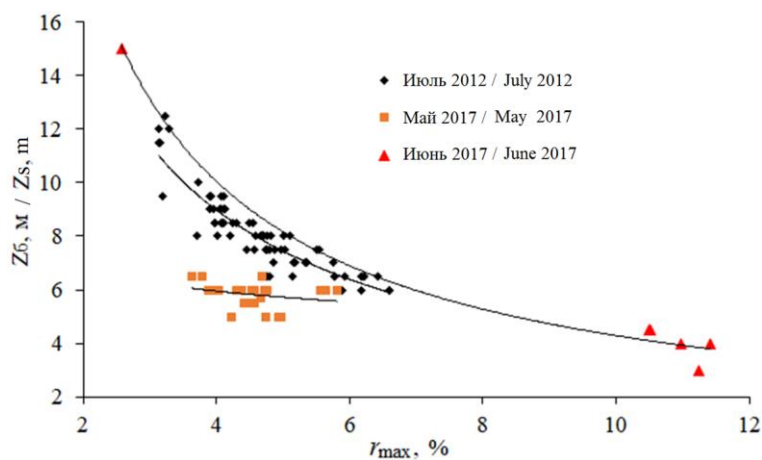
Рис. 1. Коэффициент яркости: средние, максимальные и минимальные значения (штриховой линией показаны средние значения за май – сентябрь 2002–2019 гг., кроме 2012 и 2017 гг., по данным наблюдений с океанографической платформы)

Fig. 1. Reflectance coefficient: mean, maximum and minimum values (dashed line is for mean values for May–September 2002–2019 (except for 2012 and 2017), according to the observation data obtained from the oceanographic platform)

Глубина видимости белого диска в период проведения измерений на океанографической платформе и в ходе экспедиционных исследований имела anomalно низкие значения (см. таблицу). Характерный диапазон значений Z_6 в глубоководной части Черного моря, по данным [14], в среднем составляет 10–20 м. В июле 2012 г. Z_6 в среднем составила 8 м. Измеренные значения изменялись в пределах от 5 до 12.5 м. В мае 2017 г. средняя величина $Z_6 = 6$ м, диапазон значений составил от 5 до 6.5 м. В июне 2017 г. среднее значение $Z_6 = 6$ м, диапазон значений от 3 до 17 м.

Между максимальными значениями коэффициента яркости и глубиной видимости белого диска в 2012 г. и в июне 2017 г. наблюдается существенная корреляция (рис. 2). Данные аппроксимируются степенной зависимостью, коэффициенты корреляции – 0.92 и 0.97 соответственно.

Можно отметить, что в июне 2017 г. такой связи не наблюдается, коэффициент корреляции составляет всего 0.26. В работе [15, с. 28] показано, что Z_6 сильно зависит от концентрации мелких частиц взвеси в воде: «с увеличением их концентрации Z_6 уменьшается, даже если при этом общая концентрация взвеси остается неизменной». В данном случае на протяжении всего периода измерений в мае 2017 г. концентрация мелких частиц



Р и с . 2. Связь глубины видимости белого диска с максимумом коэффициента яркости

Fig. 2. Relation between the Secchi disk depth and maximum reflectance coefficient

взвешенного вещества высока и существенно не изменяется, соответственно не меняются значения прозрачности.

Средние измеренные значения показателя ослабления света в красной области спектра составили: $c(667) = 0.88 \pm 0.03 \text{ м}^{-1}$ в июле 2012 г., $c(660) = 0.91 \pm 0.04 \text{ м}^{-1}$ в мае 2017 г. и $c(620) = 0.97 \pm 0.12 \text{ м}^{-1}$ в июне 2017 г. (см. таблицу). Значения завышены по сравнению с характерными для этого района и периода времени в $\sim 2\text{--}3$ раза ²⁾.

На рис. 3–5 показаны пространственные распределения биооптических параметров по данным экспедиционных измерений в июне 2017 г. Значения показателя ослабления света на длине волны 520 нм (рис. 3) в среднем составили $c(520) = 0.81 \pm 0.13 \cdot \text{м}^{-1}$, что примерно в два раза выше климатических ²⁾. Область повышенных значений показателя ослабления $c(520)$ совпадает с областью повышенных значений показателя рассеяния назад взвешенными частицами $b_{\text{вр}}(550)$, полученными по спутниковым данным Level 3 (рис. 4). Средние значения $b_{\text{вр}}$ на длине волны 550 нм составили $b_{\text{вр}}(550) = 0.028 \pm 0.004 \cdot \text{м}^{-1}$, что на порядок выше наблюдаемых вне периода интенсивного развития кокколитофорид [16]. Численность клеток кокколитофорид $N_{\text{Е.һух1}}$, по биологическим данным, изменялась в диапазоне от 150 тыс. кл./л до 1.7 млн кл./л (рис. 5). В среднем $N_{\text{Е.һух1}}$ составила $N_{\text{Е.һух1}} = 0.6 \pm 0.4$ млн кл./л.

При сопоставлении распределений данных прямых определений концентрации клеток кокколитофорид и измерений показателя ослабления света наблюдается качественное соответствие области повышенных значений показателя $c(520)$ (рис. 3) и пониженных значений концентрации клеток $N_{\text{Е.һух1}}$ (рис. 5), т. е. взвешенного вещества в виде кокколитов больше, чем живых клеток кокколитофорид. Изменения показателя ослабления происходят

²⁾ Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. 92 с.

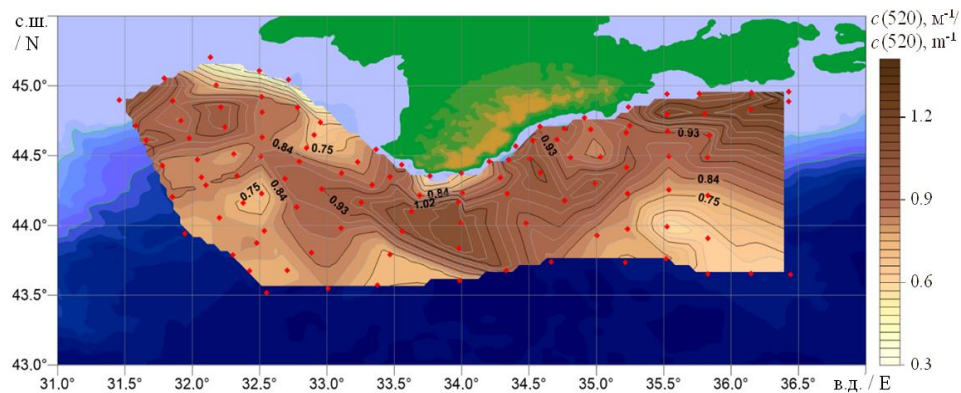


Рис. 3. Показатель ослабления света на длине волны 520 нм (точками показаны станции, где проводились оптические измерения)

Fig. 3. Beam attenuation coefficient at wavelength 520 nm (points are for the stations where optical measurements were performed)

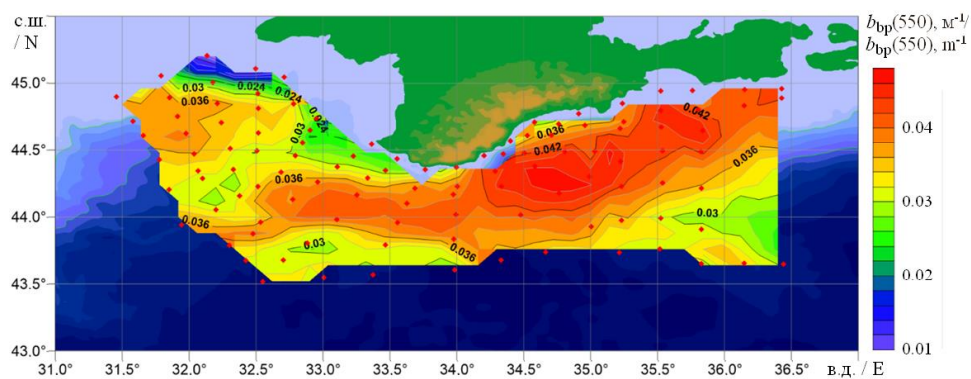


Рис. 4. Рассеяние назад взвешенным веществом по спутниковым данным MODIS Level 3, пересчитанное к длине волны 550 нм

Fig. 4. Backscattering with suspended matter, according to the satellite MODIS Level 3 data, corrected to wave length 550 nm

в узком диапазоне (СКО составляет около 20 %), за исключением станции 64, расположенной на шельфе, тогда как концентрация клеток меняется на порядок и более (рис. 6). При этом корреляция между указанными величинами по 26 имеющимся точкам незначима: $R = -0.19$ (рис. 6).

Наибольшее влияние на рассеяние и, следовательно, показатель ослабления света оказывает мелкая взвесь, во время цветения состоящая из сброшенных кокколитов. Можно заключить, что области повышенных значений показателя ослабления могут возникнуть по двум причинам. В первом случае это области с повышенной некокколитной составляющей во взвеси, что может объясняться происхождением данной водной массы, богатой, например, частицами взвешенного вещества терригенного происхождения. В работе [17] показано, что данная струя с повышенными значениями показателя ослабления берет начало у берегов Кавказа и, таким образом, подвержена сильному влиянию речного стока. В другом случае это области,

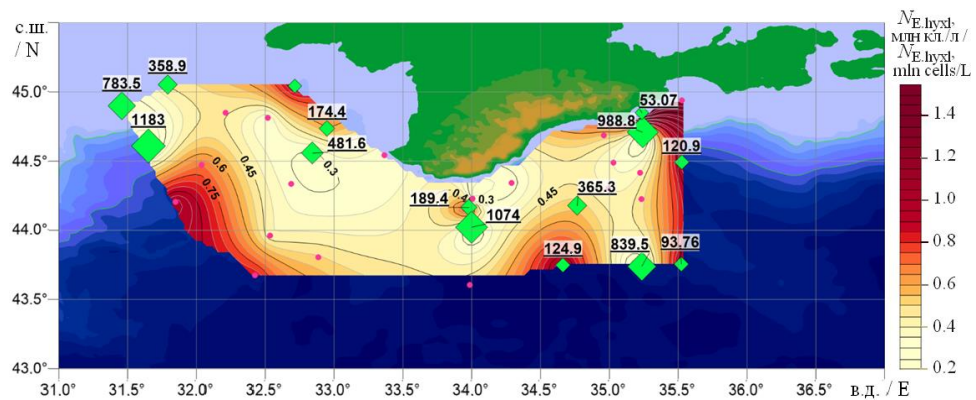


Рис. 5. Распределение концентрации клеток кокколитофорид *Emiliana huxleyi* (точки – станции отбора проб; ромбами отмечены станции, для которых выполнены расчеты по спутниковым данным, число возле ромба и размер ромба показывают рассчитанное отношение числа кокколитоидов к числу клеток)

Fig. 5. Distribution of coccolithophore *Emiliana huxleyi* cell concentration (points are for sampling stations; diamonds are for the stations, calculations for which were performed using satellite data; a numeral near a diamond and the diamond size show the calculated ratio of coccolith number to cell number)

где цветение вошло в конечную фазу, когда число сброшенных кокколитоидов значительно превышает число клеток, а бурное размножение клеток прекратилось. На ст. 64, где наблюдалась относительно чистая вода (низкий показатель ослабления), тем не менее зафиксировано достаточно высокое по сравнению с остальными число клеток – 954 тыс. Следовательно, можно предположить, что в данной точке в момент наблюдений развитие кокколитофорид только начиналось и количество сброшенных кокколитоидов было мало.

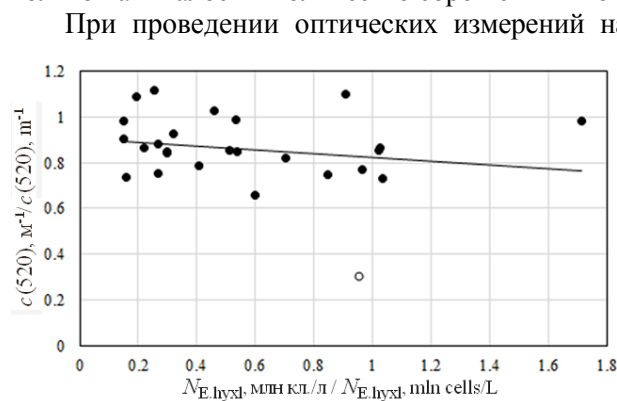


Рис. 6. Сравнение показателя ослабления света с концентрацией клеток кокколитофорид (ст. 64 отмечена пустым кружком)

Fig. 6. Comparison of the beam attenuation coefficient and coccolithophore cell concentration (Station 64 is marked as a blank circle)

При проведении оптических измерений на платформе биологические определения не выполнялись. Концентрация кокколитоидов N_{cocc} оценивалась по эмпирической формуле из работы [2, с. 21] $b_{b_cocc}(546) = 1.1 \cdot 10^{-13} N_{\text{cocc}}$. Показатель рассеяния назад кокколитофоридами и сброшенными кокколитоидами $b_{b_cocc}(546)$ принимался равным показателю рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(550)$, причем вклад остальной взвеси (в т. ч. клеток кокколитофорид) считался пренебрежимо малым.

Значения $b_{bp}(550)$ вычислялись по измерениям коэффициента яркости на океанографической платформе с использованием полуаналитического алгоритма [18]. Средние значения концентрации кокколитов N_{cocc} составили: $(1.29 \pm 0.23) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в июле 2012 г. и $(1.32 \pm 0.12) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в мае 2017 г. (см. таблицу).

По экспедиционным данным, в июне 2017 г. аналогичная оценка концентрации кокколитов составила $(2.37 \pm 0.69) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (см. таблицу). Значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(550)$ получены по спутниковым данным *MODIS Level 3*.

В предположении, что рассеяние назад складывается из рассеяния на клетках кокколитофорид и сброшенных кокколитах, по данным биологических определений в июне 2017 г. можно оценить концентрацию сброшенных кокколитов, как это было сделано в работе [19]:

$$b_{bp} = b_{b_cell} \cdot N_{cell} + b_{b_cocc} \cdot N_{cocc}.$$

Полученные значения $N_{cocc} = (1.46 \pm 0.42) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ численно близки к оценкам, выполненным по формуле из работы [2, с. 21]. Вклад кокколитов и клеток кокколитофорид в рассеяние назад составляет в среднем соответственно 85 и 15 %.

По полученным значениям концентрации кокколитов и биологическим данным о концентрации клеток кокколитофорид можно оценить отношение числа кокколитов к числу клеток (рис. 5). Данная величина изменяется значительно – от 53 (минимум) до 1183 (максимум). Отношение концентрации кокколитов к концентрации клеток для станций, лежащих в струе мутного течения, составляет величины порядка 1000 (рис. 5), что существенно превышает известные по литературным данным [20] величины. В качестве объяснения можно предположить наличие мелкой взвеси некокколитного (терригенного) происхождения в концентрациях, сравнимых с концентрациями кокколитов. Однако провести точное разделение на основании имеющихся данных нельзя.

Таким образом, данные о численности клеток подтверждают сделанные в наших предыдущих работах выводы о том, что в 2017 г. цветение было сильно «разбавлено» терригенной взвесью. Для периода цветения кокколитофорид характерна прежде всего высокая изменчивость биологических свойств воды. Причем взаимосвязь между их пространственным распределением и оптическими свойствами воды слабая и определяется, по видимому, как гидрологией, так и ходом развития популяции в зависимости от акватории. Таким образом, с оптической точки зрения показателем цветения оказывается численность сброшенных кокколитов, а не клеток, что может привести к неверному описанию биологической ситуации.

Заключение

Оптические измерения на океанографической платформе, экспедиционные исследования в северной части Черного моря и анализ полученных данных показали значительное влияние интенсивного развития кокколитофорид на все биооптические характеристики вод.

Значения коэффициента яркости в спектральном максимуме составили в среднем: 4.7 % в июле 2012 г., 4.5 % в мае 2017 г. и 9.8 % в июне 2017 г., тогда как в отсутствие цветения наблюдались величины порядка 1–2 %.

Средние значения показателя ослабления света в красной области спектра в два-три раза превышали значения, наблюдаемые при отсутствии цветения. Значения показателя ослабления света в среднем составили $0.88 \pm 0.03 \text{ м}^{-1}$ в июле 2012 г., $0.91 \pm 0.04 \text{ м}^{-1}$ в мае 2017 г. и $0.97 \pm 0.12 \text{ м}^{-1}$ в июне 2017 г.

Глубина видимости белого диска в период проведения измерений имела аномально низкие значения – в среднем 8 и 6 м в 2012 г. и 2017 г. соответственно. Значимая корреляция между коэффициентом яркости и глубиной видимости белого диска наблюдалась при высокой изменчивости оптических показателей.

Средние значения показателя рассеяния назад взвесью на длине волны 550 нм, по спутниковым данным, составили $0.028 \pm 0.004 \text{ м}^{-1}$, что на порядок выше значений, наблюдаемых вне цветения кокколитофорид. Рассчитанные по этим данным концентрации кокколитов в среднем составили: $(1.29 \pm 0.23) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в июле 2012 г., $(1.32 \pm 0.12) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в мае 2017 г. и $(2.37 \pm 0.69) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в июне 2017 г.

Численность клеток кокколитофорид, по биологическим данным, изменялась в диапазоне от 150 до 1.7 млн кл./л и в среднем составила 0.6 ± 0.4 млн кл./л. По этим данным, оценка концентрации сброшенных кокколитов составила $(1.46 \pm 0.42) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Анализ оптических и биологических экспедиционных исследований в июне 2017 г. в северной части Черного моря показал слабую связь между биологическими характеристиками цветения и оптическими. Оптические свойства на исследуемом полигоне определялись не только кокколитофоридной взвесью, но и взвесью терригенного происхождения. С оптической точки зрения показателем цветения оказывается численность кокколитов, а не клеток, что может привести к неверному описанию биологической ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 1. С. 45–53.
2. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов / В. И. Маньковский [и др.]. Севастополь, 1996. 32 с. (Препринт / МГИ НАН Украины).
3. *Cokacar T., Oguz T., Kubilay N.* Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004. Vol. 51, iss. 8. P. 1017–1031. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.007>
4. *Паутова Л. А., Микаэлян А. С., Силкин В. А.* Структура планктонных фитоценов шельфовых вод северо-восточной части Черного моря в период массового развития *Emiliania huxleyi* в 2002–2005 гг. // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 408–417.

5. *Карабашев Г. С., Шеберстов С. В., Якубенко В. Г.* Июньский максимум нормализованной яркости и его связь с гидрологическими условиями и цветением кокколитофорид в Черном море // *Океанология*. 2006. Т. 46, № 3. С. 331–343.
6. *Balch W. M., Kilpatrick K. A., Trees C. C.* The 1991 coccolithophore bloom in the central North. I. Optical properties and factors affecting their distribution // *Limnology and Oceanography*. 1996. Vol. 41, iss. 8. P. 1669–1683. doi:10.4319/lo.1996.41.8.1669
7. *Корчемкина Е. Н., Ли М. Е.* Аномальные оптические характеристики прибрежных вод Черного моря в июле 2012 года и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 4. С. 101–105.
8. *Ли М. Е., Мартынов О. В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров воды // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ–Гидрофизика, 2000. С. 163–173.
9. *Маньковский В. И.* Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ–Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 56–60.
10. *Ли М. Е.* Разработки гидрооптических приборов в МГИ НАН Украины // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ–Гидрофизика, 2012. Вып. 17. С. 7–20.
11. *Латушкин А. А.* Спектральный измеритель коэффициента ослабления света для проведения океанографических подспутниковых исследований // *Сучасні технології проектування керуючих та мехатронних систем – 2013 = Современные технологии проектирования управляющих и мехатронных систем: материалы міжнародної науково-технічної конференції (Севастополь, 16–19 квітня 2013 р.)* / [науковий редактор О. Т. Барабанов]. Севастополь : Видавництво Севастопольського національного технічного університету, 2013. С. 192–196
12. *Сорокин Ю. И.* К методике концентрирования фитопланктона // *Гидробиологический журнал*. 1979. Т. 15, № 2. С. 71–76.
13. *Суханова И. Н.* Концентрирование фитопланктона в пробе // *Современные методы количественной оценки распределения морского планктона*. М. : Наука, 1983. С. 97–105.
14. *Ли М. Е., Латушкин А. А., Мартынов О. В.* Долговременная изменчивость прозрачности поверхностных вод Черного моря // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 40–46. doi:10.7868/S207366731803005X
15. *Маньковский В. И.* Влияние состава взвеси на глубину видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 1. С. 24–28. doi:10.15372/AOO20190104
16. *Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea) / M. Chamì [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110, iss. C11. C11020. doi:10.1029/2005JC003008
17. Распределение биооптических параметров в фотическом слое северной части Черного моря в период интенсивного цветения кокколитофорид / А. А. Латушкин [и др.] // *Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2019. С. 125–130.
18. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости входящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33

19. Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по спутниковым данным / О. В. Копелевич [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 267–279. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279
20. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine / W. M. Balch [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 1991. Vol. 36, iss. 4. P. 629–643. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0629>

Об авторах:

Корчемкина Елена Николаевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0526-4083**, **ResearcherID: I-1595-2015**, **Scopus Author ID: 23004799100**, korchemkina@mhi-ras.ru

Маньковская Екатерина Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Ли Раиса Игнатьевна, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А.О.Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2482-0105**, **Scopus Author ID: 57214997607**, raisa-lee@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Корчемкина Елена Николаевна – постановка проблемы, измерения коэффициента яркости, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов, коррекция текста статьи

Маньковская Екатерина Викторовна – обработка данных измерений, сбор информации для исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка текста статьи и графических материалов, коррекция текста статьи

Ли Раиса Игнатьевна – исследование фитопланктона, обработка и описание результатов биологических определений, обсуждение текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mikaelyan, A.S., Silkin, V.A. and Pautova, L.A., 2011. Coccolithophorids in the Black Sea: Their Interannual and Long-Term Changes. *Oceanology*, 51(1), pp. 39–48. <https://doi.org/10.1134/S0001437011010127>
2. Mankovsky, V.I., Vladimirov, V.L., Afonin, E.I., Mishonov, A.V., Solov'ev, M.V., Anninskiy, B.E., Georgieva, L.V. and Yunev, O.A., 1996. [Long-term Variability of the Black Sea Water Transparency and Factors Determined Its Strong Decrease in the Late 1980s Early 1990s]. Sevastopol, 32 p. Preprint (in Russian, unpublished).
3. Cokacar, T., Oguz, T. and Kubilay, N., 2004. Satellite-detected Early Summer Coccolithophore Blooms and Their Interannual Variability in the Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(8), pp. 1017–1031. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.007>
4. Pautova, L.A., Mikaelyan, A.S. and Silkin, V.A., 2007. Structure of Plankton Phytocoenoses in the Shelf Waters of the Northeastern Black Sea during the *Emiliana huxleyi* Bloom in 2002–2005. *Oceanology*, 47(3), pp. 377–385. <https://doi.org/10.1134/S0001437007030101>

5. Karabashev, G.S., Sheberstov, S.V. and Yakubenko, V.G., 2006. The June Maximum of Normalized Radiance and Its Relation to the Hydrological Conditions and Coccolithophorid Bloom in the Black Sea. *Oceanology*, 46(3), pp. 305–317. <https://doi.org/10.1134/S0001437006030027>
6. Balch, W.M., Kilpatrick, K.A. and Trees, C.C., 1996. The 1991 Coccolithophore Bloom in the Central North Atlantic. 1. Optical Properties and Factors Affecting Their Distribution. *Limnology and Oceanography*, 41(8), pp. 1669–1683. doi:10.4319/lo.1996.41.8.1669
7. Korchemkina, E.N. and Lee, M.E., 2015. Anomalous Optical Properties of the Black Sea in July 2012 and Relationship with the Concentration of Mineral Suspension in the Water. *Fundamentalnaya i Prilkladnaya Gidrofizika*, 8(4), pp. 101–105 (in Russian).
8. Lee, M.E. and Martynov, O.V., 2000. [Reflectance Coefficient Meter for Sub-Satellite Measurements of Biooptical Water Parametres]. In: MHI, 2000. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 1, pp. 139–145 (in Russian).
9. Mankovsky, V.I., 2012. Spectral Laboratory Transparency Meter with Variable Base. In: MHI, 2012. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Issue 17, pp. 56–60 (in Russian).
10. Lee, M.E., 2012. Developments of Hydrooptics Instruments in the MHI NAS of Ukraine. In: MHI, 2012. *Monitoring Systems of Environment*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Issue 17, pp. 7–20 (in Russian).
11. Latushkin, A.A., 2013. [A Spectral Meter of Beam Attenuation Coefficient for Oceanographic Sub-Satellite Studies]. In: O. T. Barabanov, ed., 2013. *Modern Design Technologies of Control and Mechatronic Systems – 2013: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Sevastopol, 16–19 2013)*. Sevastopol: Izdatelstvo SevNTU, pp. 192–196 (in Russian).
12. Sorokin, Yu.N., 1979. [On Methods of Phytoplankton Concentration]. *Gidrobiologicheskii Zhurnal*, 15(2), pp. 71–76 (in Russian).
13. Sukhanova, I.N., 1983. [Concentration of Phytoplankton in a Sample]. In: M. E. Vinogradov, ed., 1983. *[Modern Methods of Quantitative Estimation of Marine Plankton Distribution]*. Moscow: Nauka, pp. 97–105 (in Russian).
14. Lee, M.E., Latushkin, A.A. and Martynov, O.V., 2018. Long-term Transparency Variability of the Black Sea Surface Waters. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 11(3), pp. 40–46. doi:10.7868/S207366731803005X (in Russian).
15. Mankovsky, V.I., 2019. Influence of the Composition of Suspended Matter on the Secchi Disk Depth. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(3), pp. 284–288. <https://doi.org/10.1134/S1024856019030138>
16. Chami, M., Shybanov, E.B., Churilova, T.Y., Khomenko, G.A., Lee, M.E., Martynov, O.V., Berseneva, G.P. and Korotaev, G.K., 2005. Optical Properties of the Particles in the Crimea Coastal Waters (Black Sea). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11), C11020. doi:10.1029/2005JC003008
17. Latushkin, A.A., Sysoev, A.A., Lee, R.I., Sysoeva, I.V., 2019. Distribution of Biooptical Parameters in the Photic Layer of the Northern Part of the Black Sea During Intensive Coccolithophore Blooms. In: Shirshov Institute of Oceanology, 2019. *Proceedings of X Anniversary All-Russia Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters” (ONW2019)*. Saint-Petersburg: JSC “Izd. “KHIMIZDAT”, pp. 125–130 (in Russian).

18. Lee, M.E., Shybanov, E.B., Korchemkina, E.N. and Martynov, O.V., 2015. Determination of the Concentration of Seawater Components based on Upwelling Radiation Spectrum. *Physical Oceanography*, (6), pp. 15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
19. Kopelevich, O.V., Karalli, P.G., Lokhov, A.S., Sahling, I.V. and Sheberstov, S.V., 2017. Prospects for Improving the Accuracy of Estimates of the Parameters of Coccolithophore Blooms in the Barents Sea from Satellite Data. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 14(7), pp. 267–279. doi:10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279 (in Russian).
20. Balch, W.M., Holligan, P.M., Ackleson, S.G. and Voss, K.J., 1991. Biological and Optical Properties of Mesoscale Coccolithophore Blooms in the Gulf of Maine. *Limnology and Oceanography*, 36(4), pp. 629–643. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0629>

About the authors:

Elena N. Korchemkina, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math), **ORCID ID: 0000-0003-0526-4083**, **ResearcherID: I-1595-2015**, **Scopus Author ID: 23004799100**, korchemkina@mhi-ras.ru

Ekaterina V. Mankovskaya, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0002-4086-1687**, **ResearcherID: AAB-5303-2019**, emankovskaya@mhi-ras.ru

Raisa I. Lee, Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-2482-0105**, **Scopus Author ID: 57214997607**, raisa-lee@yandex.ru

Contribution of the authors:

Elena N. Korchemkina – task setting, reflectance coefficient measurements, processing, analysis and description of the study results, text and visuals preparation, text editing

Ekaterina V. Mankovskaya – measurement data processing, collection of information to study, analysis and discussion of the results, text and visuals preparation, text editing

Raisa I. Lee – phytoplankton study, processing and description of biological determination results, text discussion

All the authors have read and approved the final manuscript.