

## УЧЕТ СТРАТИФИКАЦИИ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАСЧЕТА СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ В ВОДАХ ПЕРВОГО ТИПА

А. В. Юшманова<sup>1,2\*</sup>, Д. Н. Дерягин<sup>1,2</sup>, Д. И. Глуховец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет),  
Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9;

\*e-mail: [yushmanova@phystech.edu](mailto:yushmanova@phystech.edu)

Представлена методика расчета вертикальных профилей спектрального показателя поглощения взвешенных частиц с учетом стратификации показателя ослабления морской воды в поверхностном слое. Методика разработана на основе данных судовых измерений, выполненных в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Северном Ледовитом океане («Европейская Арктика-2021», 24 июля – 26 августа 2021 г.). Рассчитанные профили использовались для оценки вертикального распределения концентрации хлорофилла *a* и дальнейшего численного моделирования нисходящего потока фотосинтетически активной радиации. Сравнение рассчитанных параметров световых полей с результатами прямых определений показало хорошее соответствие (среднеквадратичная ошибка между измеренными и рассчитанными значениями фотосинтетически активной радиации составляет 8 %).

**Ключевые слова:** спектральный показатель поглощения, показатель ослабления, фотосинтетически активная радиация, Арктика, концентрация хлорофилла *a*

### Введение

Показатель поглощения морской воды – одна из трех первичных оптических характеристик, полностью определяющих распространение излучения в водной толще (Шифрин, 1983). Подводные световые поля влияют на первичную продукцию и энергетический баланс поверхностного слоя океана (Kirik, 1994; Глуховец и др., 2021; Копелевич и др., 2006). Поглощение света морской водой связано с растворенным органическим веществом и взвешенными в ней частицами. Исследование выполнялось в водах первого типа (Morel, Prieur, 1977), в которых значения первичных гидрооптических характеристик можно параметризовать через концентрацию хлорофилла *a* (Хл), пренебрегая вкладом остальных растворенных и взвешенных в морской воде компонентов.

Клетки фитопланктона и связанная с ними концентрация хлорофилла неоднородно распределены по глубине (Bouman et al., 2020), что не позволяет детально измерять вертикальную изменчивость спектрального поглощения взвеси в случае

использования методик, требующих обработки проб морской воды. Кроме того, прямые определения спектров показателя поглощения взвешенных частиц  $a_p(\lambda)$  довольно трудоемки. Предлагаемый в работе подход заключается в расчете распределений  $a_p(\lambda, z)$  по глубине по результатам судовых измерений вертикальных профилей показателя ослабления морской воды и спектров показателя поглощения взвешенных частиц, измеренных на нескольких горизонтах. По полученным данным можно рассчитать вертикальные профили концентрации Хл. Модельные расчеты параметров световых полей выполнялись с помощью программы Hydrolight (<https://www.sequoiasci.com/product/hydrolight>). Цель исследования – разработка методики, которая позволит с хорошей точностью учесть влияние стратификации биооптических характеристик для расчета световых полей в водах первого типа путем численного решения уравнения переноса излучения.

### Материалы и методы

Судовые данные получены в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-84), проходившем 24 июля – 26 августа 2021 г. в водах Северного Ледовитого океана, удаленных от источников материкового стока. Такие воды могут быть отнесены к первому типу (Morel, Prieur, 1977). Карта используемых в работе станций представлена на рисунке 1.

Спектры поглощения света морской водой измерялись спектрофотометром с интегрирующей сферой ICAM (Глуховец и др., 2017; Погосян и др., 2009) на пробах, отобранных с различных горизонтов. Поглощение взвешенными частицами  $a_p(\lambda)$  рассчитывается как разность между поглощением морской и профильтрованной через ядерные фильтры (размер пор 0.2 мкм) водой, а поглощение окрашенным растворенным органическим веществом  $a_g(\lambda)$  – как разница между поглощением фильтрата и чистой водой. Вертикальные профили показателя ослабления света морской водой на длине волны 530 нм  $c(530)$  получены с помощью прозрачномера ПУМ-200 (Артемьев и др., 2021). Измеритель подводной облученности в диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР) LI-COR использовался для получения вертикальных профилей ФАР. Профили флуоресценции получены с использованием датчика WET Labs ECO FL(RT)D, калиброванного в единицы концентрации Хл. Прямые определения концентрации Хл выполнялись флуорометрическим экстракционным методом (Holm-Hansen and Riemann, 1978).

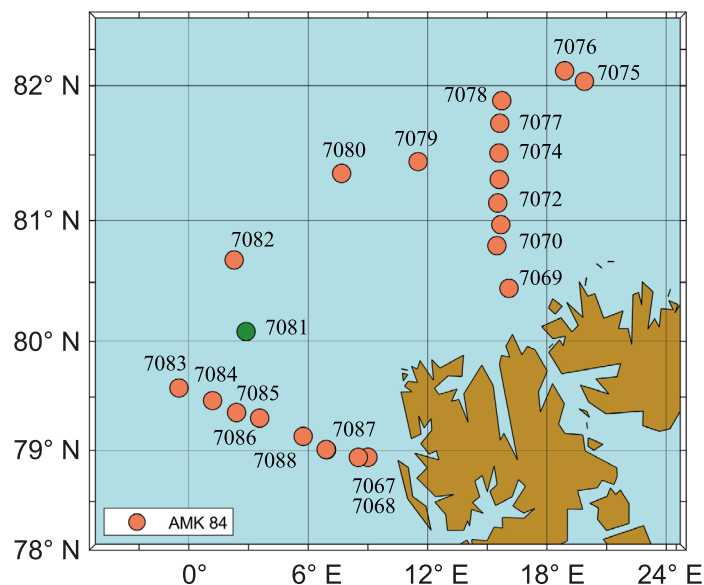


Рис. 1 – Карта станций 84-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», использованных в работе, 8–15 августа 2021 г.

Пробы воды для определения показателей поглощения и концентрации  $Chl_{in situ}$  отобраны батометрами, установленными на комплексе *Rosett*. Также значения концентрации Хл рассчитаны по двум методикам:  $Chl_{Boss}$  (Boss et al., 2007) и  $Chl_{Bricaud}$  (Bricaud et al., 1998). Значения  $Chl_{Boss}$  рассчитывались по амплитуде пика поглощения Хл в длинноволновой области с использованием формулы:

$$Chl_{Boss} = \frac{a_p(676) - 20/46 * a_p(650) - 26/46 * a_p(696)}{0.014}, \quad (1)$$

где в скобках указаны длины волн, а  $0.014 \text{ (мкг/л)}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  – удельное поглощение Хл для вод первого типа. Значения коэффициентов в числителе отличаются от предложенных авторами (Boss et al., 2007) для соответствия спектральному диапазону данных  $a_p(\lambda)$ , измеряемых с помощью интегрирующей сферы.

Значения  $Chl_{Bricaud}$  рассчитаны с использованием пакета *Toolbox Global Optimization* среды *Matlab*, который специализирован на поиск минимумов функций. Найдены значения концентраций Хл с помощью модели (Bricaud et al., 1998) такие, чтобы среднеквадратичное отклонение (СКО) между измеренными на интегрирующей сфере спектрами поглощения взвешенными частицами и рассчитанными спектрами поглощения пигментов фитопланктона было минимальным.

Моделирование спектральных характеристик подводных световых полей в программе *Hydrolight* происходит путем численного решения уравнения переноса излучения в толще морской воды (Mobley, Hedley, 2019). Расчет выполнялся для модели вод первого типа, встроенной в *Hydrolight* (Mobley, Hedley, 2021). В расчетах использовались результаты интерполяции по глубине концентрации Хл, измерения которой выполнялись на отдельных горизонтах. Кроме того, использовались данные

о концентрации Хл, рассчитанные по спектрам  $a_p(\lambda, z)$  с шагом по глубине 0.2 м. Для сравнения результатов расчета с данными натуральных измерений использовался вертикальный профиль ФАР.

## Результаты и обсуждение

### *Методика учета стратификации биооптических характеристик*

Для расчета вертикальных профилей  $a_p(\lambda, z)$  по данным измерений на нескольких горизонтах и профилю  $c(530, z)$  необходимо найти связь между этими величинами. Значения показателя ослабления света морской воды  $c(530)$  складываются из показателей поглощения и рассеяния. В используемом приближении вод первого типа обе эти величины могут быть заданы как функции концентрации Хл. В частности, спектры поглощения частицами в таких водах определяются главным образом концентрацией этого пигмента (Bricaud et al., 1998). Это позволяет получить уравнения регрессии между измеренными на одних и тех же глубинах значениями  $a_p(\lambda)$  и  $c(530)$ .

Сопоставление  $c(530)$  и  $a_p(\lambda)$  для различных длин волн показало, что в диапазонах 400–555 нм и 670–680 нм коэффициент детерминации линейной регрессии  $R^2$  принимает значения 0.68–0.73. Эти спектральные диапазоны соответствуют полосам поглощения Хл (Falkowski, Raven, 2013). В качестве опорной длины волны для построения корреляционного соотношения, связывающего  $a_p(\lambda)$  и  $c(530)$ , была выбрана  $\lambda_0 = 443$  нм (рисунок 2). Такой выбор связан с возможностью сопоставления значений показателя поглощения взвеси  $a_p(443)$ , рассчитанных на основе  $c(530)$ , с данными стандартных продуктов спутниковых сканеров цвета.

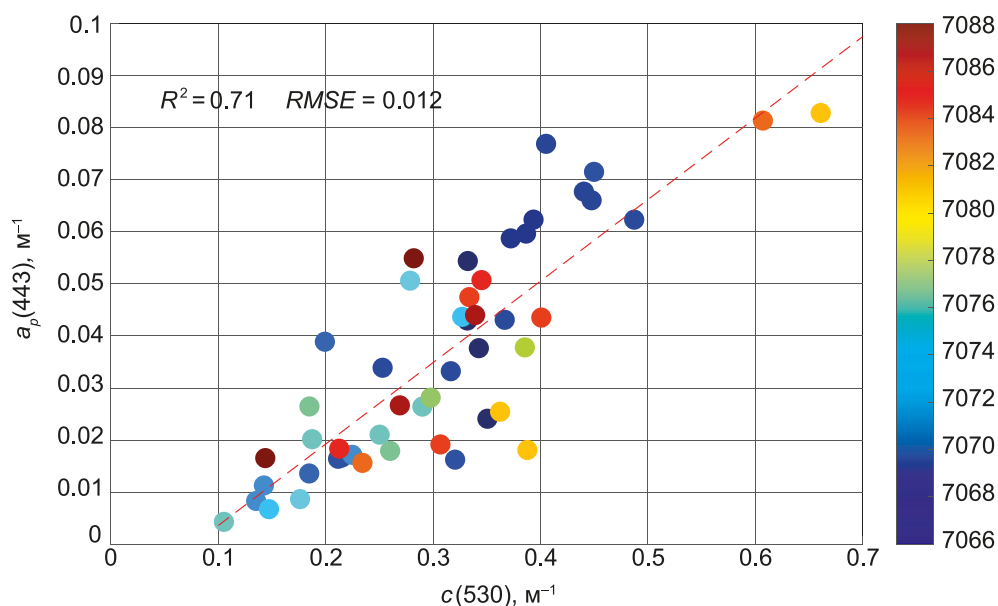


Рис. 2 – Диаграмма рассеяния между  $a_p(443)$  и  $c(530)$ . Красный пунктир – линия регрессии, цветом обозначены номера станций

Полученное уравнение регрессии:

$$a_p^{calc}(443, z) = 0.16 * c(530, z) - 0.01 \quad (2)$$

используется для расчета вертикальных профилей показателя поглощения взвешенными частицами на длине волны 443 нм. Затем выполняется интерполяция (между горизонтами  $z_i$  с измеренными на пробах морской воды спектральными значениями  $a_p(\lambda, z_i)$ ) и экстраполяция (от верхнего горизонта к поверхности и от нижнего горизонта вниз) для получения  $a_p^{int}(\lambda, z)$ . Итоговые значения показателя поглощения взвесью рассчитываются по формуле:

$$a_p(\lambda, z) = \frac{a_p^{calc}(443, z)}{a_p^{int}(443, z)} a_p^{int}(\lambda, z), \quad (3)$$

где  $a_p^{int}(443, z)$  – значения  $a_p^{int}(\lambda, z)$  на длине волны 443 нм, а отношение  $\frac{a_p^{calc}(443, z)}{a_p^{int}(443, z)}$  – множитель, учитывающий вертикальную изменчивость показателя

поглощения взвешенными частицами через связь с показателем ослабления (формула 2). Использование регрессионного уравнения, полученного по данным измерений на всех станциях рейса, может приводить к значительным различиям между рассчитанными значениями  $a_p(\lambda, z_i)$  и непосредственно измеренными на глубинах  $z_i$ . Эти различия объясняются вариациями содержания и состава морской взвеси, от которых зависят первичные гидрооптические характеристики (Левин, Копелевич, 2007). Несмотря на возможную потерю точности (относительная ошибка около 35 %) в значениях  $a_p(\lambda, z_i)$ , восстановленные профили  $a_p(\lambda, z)$  позволяют проводить более точную оценку характеристик световых полей благодаря детальному учету стратификации взвешенных частиц, что показано в следующем разделе.

### **Пример использования методики**

Для моделирования распространения излучения в водах первого типа необходимы значения концентрации Хл. Для их расчета использовались две биооптические модели. Для оценки их применимости построены диаграммы рассеяния для данных прямых определений концентрации Хл и рассчитанных по двум методикам  $Chl_{Boss}$  (рисунок 3а) и  $Chl_{Bricaud}$  (рисунок 3б) на основе результатов измерений  $a_p(\lambda, z_i)$ . Высокие значения коэффициента детерминации подтверждают предположение о том, что поглощение взвешенными частицами в данном регионе главным образом связано с поглощением фитопланктоном. Сравнение показывает, что модель (Boss et al., 2007) позволяет более точно оценивать концентрацию Хл по спектрам  $a_p(\lambda, z_i)$ . В дальнейшем будет использована только эта модель.

На рисунке 3в представлена диаграмма рассеяния между данными прямых определений концентрации Хл и результатами ее расчета по флуоресцентным данным. Различие в количестве пар данных связано с тем, что пробы на концентрацию Хл отбирались чаще, чем на поглощение морской воды. Интенсивность флуоресценции может изменяться в зависимости от условий освещения, видового состава фитопланктона и состояния клеток (Карабашев, 1987; Falkowski, Raven, 2013). Перечисленные факторы влияют на связь концентрации и интенсивности флуоресценции Хл (Глуховец, 2019). Вертикальные профили флуоресценции Хл могут быть использованы для получения профилей его концентрации. Однако, как будет показано, точность расчета ФАР по таким данным ниже, чем при использовании данных о показателе поглощения.

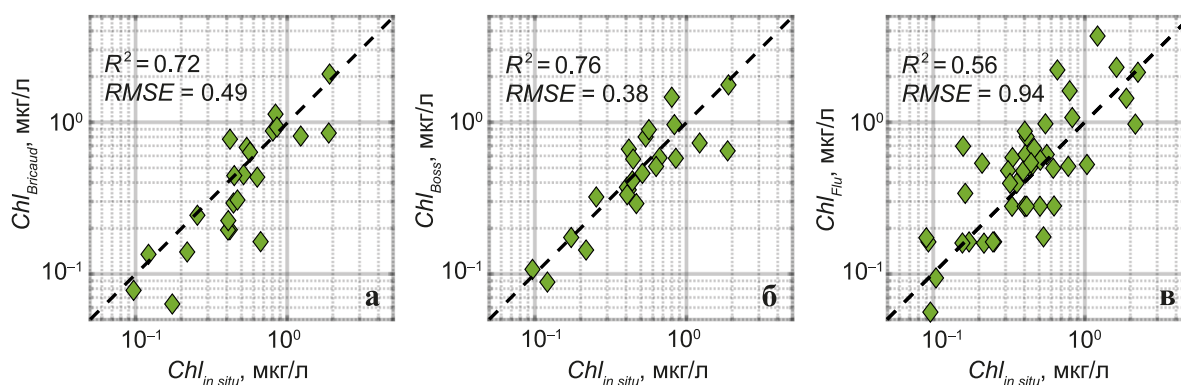


Рис. 3 – Сопоставление величин  $Chl_{in\ situ}$  с концентрациями хлорофилла, рассчитанными через спектры  $a_p(\lambda, z_i)$  по методикам: **а** – Bricaud; **б** – Boss и **в** – по интенсивности флуоресценции. Пунктирными линиями представлены линии идеального соответствия

Рассчитанные по данным абсорбционных измерений значения концентрации Хл позволяют провести гидрооптическое моделирование для оценки вертикального профиля ФАР. В качестве примера такого расчета показаны результаты для станции 7081, выполненной у кромки льда к северо-западу от Шпицбергена 13 августа 2021 г. (показана зеленым цветом на рисунке 1). Ее особенность – пик показателя ослабления морской воды на глубине около 12 м (рисунок 4а). В данном пике прямые измерения показателя поглощения не выполнялись, однако применение разработанной методики позволило получить учитывающие этот пик вертикальные профили значений спектрального показателя поглощения взвешенным веществом с шагом 0.2 м. По этим данным рассчитан профиль концентрации  $Chl_{Boss}$ . Результат расчета, а также данные о показателе ослабления и концентрациях Хл, полученные другими способами, приведены на рисунке 4а.

Профили ФАР, рассчитанные с использованием различных данных о концентрации Хл, а также измеренные в экспедиции, показаны на рисунке 4б. Прямые определения концентрации Хл выполнялись на пробах воды с горизонтов 4, 5, 10, 15, 20, 28, 35 и 47 м. В модели Hydrolight задавались 95 % облачность, зенитный угол солнца  $77^\circ$ , скорость ветра 5 м/с, что соответствовало условиям проведения судовых измерений. Как видно из рисунка 4б, расчет концентрации Хл через спектральные показатели



поглощения взвешенными частицами с учетом показателя ослабления позволяет получить профили ФАР, самые близкие к измеренным (ошибка 8 %). Расчет положения нижней границы фотического слоя (1 % подповерхностного значения ФАР) по данным прямых измерений составил 40 м, по результатам моделирования с входными параметрами  $Chl_{in\ situ}$  и  $Chl_{Flu}$  – 34 м. При использовании результатов, полученных с помощью нашего метода, граница фотического слоя оказалась ближе всего к измеренной – 41 м.

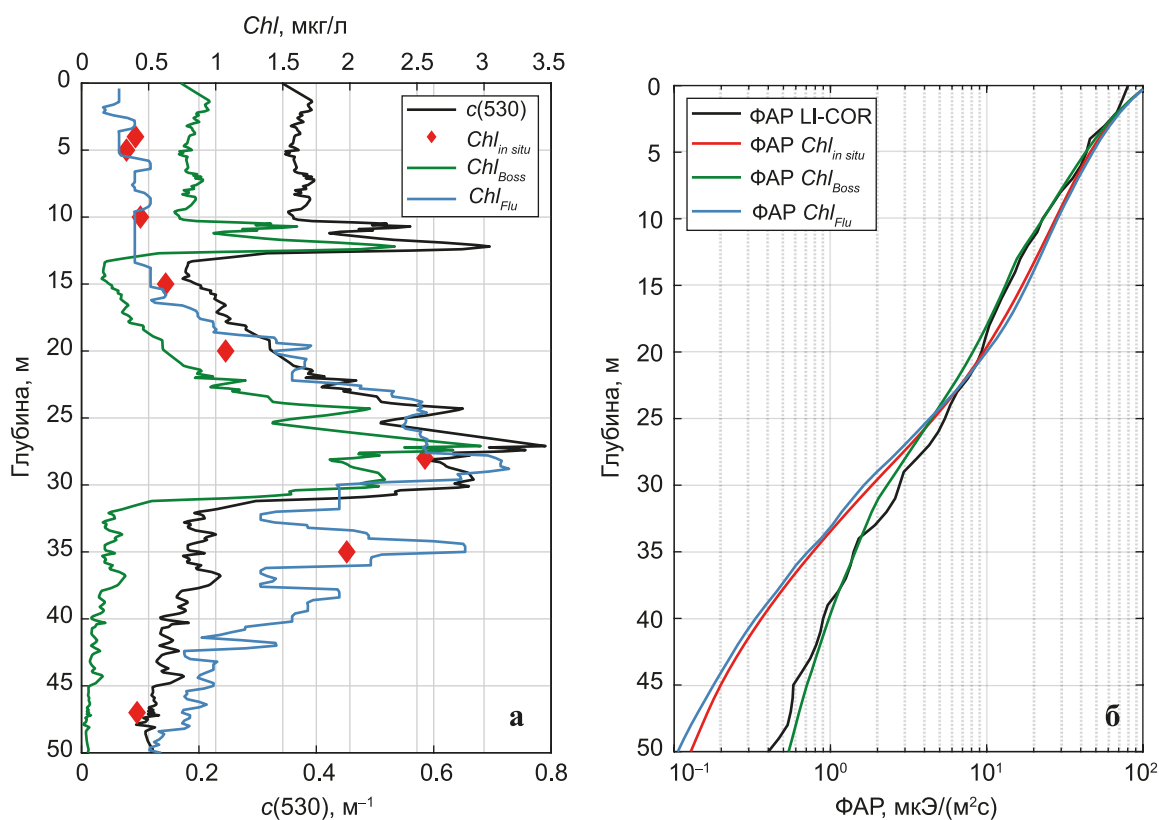


Рис. 4 а – профиль показателя ослабления света морской водой (черная линия), результаты прямых определений концентрации Хл (красные точки), профиль  $Chl_{Boss}$  (зеленым) и профиль  $Chl_{Flu}$  (синим), полученный по данным флуоресцентных измерений;

б – профили ФАР: судовые измерения (черная линия) и результаты моделирования для различных данных о концентрации Хл – по профилю флуоресценции, по  $Chl_{Boss}$  и по данным прямых определений. Станция 7081, 13 августа 2021 г.

Интересно отметить различия профилей концентрации Хл, полученные по данным флуоресцентных и абсорбционных измерений: пик около 12 м не зарегистрирован флуориметром, но четко проявился в результатах измерения показателя ослабления (рисунок 4а). По-видимому, это объясняется частицами нефитопланктонного происхождения, связанными с таянием льда. Очевидно, что вклад поглощения этих частиц учитывается ошибочно, однако это не приводит к существенным погрешностям в результатах расчета ФАР (рисунок 4б). Значительное различие измеренных и рассчитанных по предложенной методике значений концентрации Хл на горизонте 35 м объясняется изменчивостью биооптических характеристик за время между отбором проб и

определением показателя ослабления морской воды. Эта изменчивость зарегистрирована в профилях интенсивности флуоресценции, полученных с помощью установленных на прозрачномере ПУМ-200 и комплексе *Rosett* флуориметрах. Следует отметить, что эти различия не влияют на результаты расчетов световых полей.

### Заключение

Разработана методика учета стратификации оптических характеристик в поверхностном слое морской воды для расчета вертикальных профилей спектрального показателя поглощения взвешенными частицами  $a_p(\lambda, z)$ . Методика применима для вод первого типа. Получена формула, позволяющая рассчитывать значения показателя поглощения взвешенными частицами на длине волны 443 нм по данным измерений показателя ослабления света морской водой на длине волны 530 нм ( $R^2 = 0.71$ , СКО =  $0.011 \text{ м}^{-1}$ ). Для расчета концентрации хлорофилла  $a$  по полученным спектрам  $a_p(\lambda, z)$  выбран подход, основанный на использовании данных в длинноволновой полосе поглощения этого пигмента ( $R^2 = 0.76$ , СКО =  $0.38 \text{ мкг/л}$ ).

Использование разработанной методики благодаря учету стратификации взвешенных частиц позволяет проводить более точную оценку характеристик световых полей. Среднеквадратичная ошибка между значениями, рассчитанными по данным, полученным с помощью методики, и измеренными значениями фотосинтетически активной радиации составляет 8 %, в то время как ошибка расчетов по результатам выполненных на нескольких горизонтах прямых определений концентрации Хл составляет около 40 %.

В дальнейшем планируется модификация методики для расчета спектральных профилей показателя поглощения взвешенных частиц в водах второго типа, где необходим учет поглощения поступающего с речным стоком окрашенного растворенного органического вещества.

**Благодарности.** Судовые исследования проведены в рамках государственного задания по теме № 0128-2021-0001, разработка методики учета стратификации биооптических характеристик выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-77-10059, расчеты параметры световых полей – при поддержке проекта Минобрнауки № 075-15-2021-934 («Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»»). Гранты предоставлены через ИО РАН. Авторы выражают благодарность д.б.н. С. И. Погосяну за возможность использования интегрирующей сферы ICAM; В. А. Артемьеву, М. Д. Кравчишиной и А. С. Щуке – за данные судовых измерений; С. В. Вазюля за ценные замечания. Отдельно авторы благодарят рецензентов за внимание к данной статье, отзывчивость и профессионализм.



### Список литературы

1. *Артемьев В. А., Таскаев В. Р., Григорьев А. В.* Автономный прозрачномер ПУМ-200 // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). 2021.
2. *Глуховец Д. И.* Исследование биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева и Норвежского морей летом 2017 года // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 1. С. 145–160.
3. *Глуховец Д. И., Салюк П. А., Шеберстов С. В., Вазюля С. В., Салинг И. В., Степочкин И. Е.* Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки тепло-содержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2021. С. 224–224.
4. *Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Копелевич О. В., Зайцева А. Ф., Погосян С. И.* Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017. № 5. С. 39–43.
5. *Карабашев Г. С.* Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 200 с.
6. *Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Вазюля С. В., Набиуллина М. В.* Оценка объемного поглощения солнечного излучения в водной толще по спутниковым данным // Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2006. С. 109–126.
7. *Левин И. М., Копелевич О. В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм. Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 374–379.
8. *Погосян С. И., Дургарян А. М., Колюхов И. В., Чукунова О. Б., Мерзляк М. Н.* Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. 2009. Т. 49. С. 934–939.
9. *Шифрин К. С.* Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
10. *Boss E. S., Collier R., Pegau W. S., Larson G., Fennel K.* Measurements of spectral optical properties and their relation to biogeochemical variables and processes in Crater Lake, Crater Lake National Park, OR // Long-term Limnological Research and Monitoring at Crater Lake, Oregon. Springer, Dordrecht, 2007. P. 149–159.
11. *Boutan H. A., Jackson T., Sathyendranath S., Platt T.* Vertical structure in chlorophyll profiles: influence on primary production in the Arctic Ocean // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2020. Vol. 378. No. 2181. P. 20190351.
12. *Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., Claustre H.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1998. Vol. 103. No. 13. P. 31033–31044.
13. *Falkowski P. G., Raven J. A.* Aquatic photosynthesis. Princeton University Press. 2013.
14. *Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll a determination: improvements in methodology. Oikos. 1978. Jan 1:438–47.
15. *Kirk J. T.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge university press. 1994.
16. *Mobley C. D., Hedley J. D.* Hydrolight 6.0 Ecolight 6.0 Technical Documentation: Numerical Optics Ltd. 2021.
17. *Mobley C. D., Hedley J. D.* Hydrolight 6.0 Ecolight 6.0 Users' Guide: Numerical Optics Ltd. 2019.
18. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color 1 // Limnology and oceanography. 1977. Vol. 22. No. 4. P. 709–722.

Статья поступила в редакцию 06.04.2022, одобрена к печати 29.04.2022.

**Для цитирования:** Юшманова А. В., Дерягин Д. Н., Глуховец Д. И. Учет стратификации биооптических характеристик для расчета световых полей в водах первого типа // Океанологические исследования. 2022. № 50 (1). С. 38–48. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).4).

## CONSIDERING OF BIOOPTICAL CHARACTERISTICS STRATIFICATION FOR LIGHT FIELDS CALCULATION IN TYPE I WATERS

A. V. Yushmanova<sup>1,2\*</sup>, D. N. Deryagin<sup>1,2</sup>, D. I. Glukhovets<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology,  
9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia,  
\*e-mail: yushmanova@phystech.edu*

A method for calculating the vertical profiles of the spectral absorption coefficient of suspended particles is presented, taking into account the stratification of the seawater extinction coefficient the surface layer. The method was developed on the basis of data obtained in 84-th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in the Arctic Ocean (“European Arctic 2021”, July 24 – August 26, 2021). The calculated profiles were used to estimate the vertical distribution of the concentration of chlorophyll *a* and further numerical simulation of the downwelling flux of photosynthetically active radiation. Comparison of the calculated light fields parameters with the results of *in situ* determinations showed good agreement (the root-mean-square error between the measured and calculated PAR values is 8 %).

**Keywords:** spectral absorption coefficient, beam attenuation coefficient, photosynthetically active radiation, Arctic, chlorophyll *a* concentration

**Acknowledgements:** Data retrieval was carried out as part of the state assignment of SIO RAS (theme No. 0128-2021-0001); the development of a methodology for accounting for the bio-optical characteristics stratification was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-77-10059; calculations of the light fields parameters were supported by the project of the Ministry of Education and Science No. 075-15-2021-934 («Study of anthropogenic and natural factors of changes in the composition of air and environmental objects in Siberia and the Russian Sector of the Arctic in conditions of rapid climate change using the Aircraft Laboratory Tu-134 “Optic”»). The grants were provided through the SIO RAS. The authors are grateful to Dr. S. I. Pogosyan for the possibility of using the ICAM integrating sphere; V. A. Artemyev, M. D. Kravchishina and A. S. Shchuka for the shipboard measurement data; S. V. Vazyula for valuable comments. Separately, the authors thank the reviewers for their attention to this article, responsiveness and professionalism.

## References

1. Artemiev, V. A., V. R. Taskaev, and A. V. Grigoriev, 2021: Avtonomnyj prozrachnomer PUM-200. *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2021)*.
2. Boss, E. S., R. Collier, W. S. Pegau, G. Larson, and K. Fennel, 2007: Measurements of spectral optical properties and their relation to biogeochemical variables and processes in Crater Lake, Crater Lake National Park, OR. *Long-term Limnological Research and Monitoring at Crater Lake, Oregon*. Springer, Dordrecht., 149–159.
3. Bouman, H. A., T. Jackson, S. Sathyendranath, and T. Platt, 2020: Vertical structure in chlorophyll profiles: influence on primary production in the Arctic Ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society A.*, **378**, 2181, 20190351.
4. Bricaud, A., A. Morel, M. Babin, K. Allali, and H. Claustre, 1998: Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**, 13, 31033–31044.
5. Falkowski, P. G. and J. A. Raven, 2013: *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press.
6. Glukhovets, D. I., 2018: Bio-optical properties of the Barents and Norwegian seas surface layer in summer 2017. *Okeanologicheskiye Issledovaniya*, **47** (1), 145–160.
7. Glukhovets, D. I., P. A. Salyuk, S. V. Sheberstov, S. V. Vazyulya, I. V. Sahling, and I. E. Stepochkin, 2021: Retrieval of the full complex of optical characteristics for heat content assessing in the southern part of Barents Sea in June 2021. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 224–224.
8. Glukhovets, D. I., S. V. Sheberstov, O. V. Kopelevich, A. F. Zaitseva, and S. I. Pogosyan, 2017: Izmereniya pokazatelya pogloshcheniya morskoy vody s pomoshchiyu integriruyushchej sfery. *Svetotekhnika*, **5**, 39–43.
9. Holm-Hansen, O. and B. Riemann, 1978: Chlorophyll a determination: improvements in methodology. *Oikos*. Jan 1:438-47.
10. Karabashev, G. S., 1987: *Fluorescenciya v okeane*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 200 p.
11. Kirk, J. T., 1994: *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press.
12. Kopelevich, O. V., S. V. Sheberstov, V. I. Burenkov, S. V. Vazyulya, and M. V. Nabiullina, 2006: Ocenka ob'emnogo pogloshcheniya solnechnogo izlucheniya v vodnoj tolshche po sputnikovym dannym. *Fundamental'nye issledovaniya okeanov i morej*. Moscow, Nauka, 109–126.
13. Levin, I. M. and O. V. Kopelevich, 2007: Correlations between the inherent hydrooptical characteristics in the spectral range close to 550 nm. *Oceanology*, **47** (3), 344–349.
14. Mobley, C. D. and J. D. Hedley, 2021: Hydrolight 6.0 Ecolight 6.0 Technical Documentation: Numerical Optics Ltd.
15. Mobley, C. D. and J. D. Hedley, 2019: Hydrolight 6.0 Ecolight 6.0 Users' Guide: Numerical Optics Ltd.
16. Morel, A., and L. Prieur, 1977: Analysis of variations in ocean color 1. *Limnology and oceanography*, **22** (4), 709–722.
17. Pogosyan, S. I., A. M. Durgaryan, I. V. Konyukhov, O. B. Chikunova, and M. N. Merzlyak, 2009: Absorbcionnaya spektroskopiya mikrovdoroslej cianobakterij i rastvorenogo organicheskogo veshchestva: izmereniya vo vnutrennej polosti integriruyushchej sfery. *Oceanology*, **49**, 934–939.
18. Shifrin, K. S., 1983: *Physical Optics of Ocean Water*. New York: AIP Translation Series. 285 p.

Submitted 06.04.2022, accepted 29.04.2022.

**For citation:** Yushmanova, A. V., D. N. Deryagin, and D. I. Glukhovets, 2022: Considering of biooptical characteristics stratification for light fields calculation in type I waters. *Journal of Oceanological Research*, **50** (1), 38–48, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).4).