

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБЛУЧЕННОСТИ В ПРОЛИВЕ ФРАМА

мл. науч. сотр. А.К.ПАВЛОВ<sup>1</sup>, канд. геогр. наук Б.В.ИВАНОВ<sup>1,2</sup>,  
инж. Д.М.ЖУРАВСКИЙ<sup>1,2</sup>, д-р М.А.ГРАНСКОГ<sup>3</sup>, д-р К.А.СТЕДМОН<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, pavlov.alexey.k@gmail.com

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Норвежский Полярный институт, г. Тромсё

<sup>4</sup>Отдел морской экологии, Университет г. Аархус, Дания

*Проанализированы натурные данные о распределении подводной облученности с глубиной совместно с типичными для восточной части пролива Фрама показателями поглощения чистой водой, «желтым веществом» и взвесью. Оценен вклад каждого компонента в суммарное поглощение подводной облученности. Тестовые расчеты показали, что при условии постоянства показателей поглощения в поверхностном слое относительный вклад в суммарное поглощение значительно изменяется с глубиной. Наибольший вклад в суммарное поглощение радиации в поверхностном слое обусловлено поглощением морской водой и «желтым веществом», в то время как с глубиной вклад взвешенного вещества в суммарное поглощение увеличивается вследствие селективного поглощения солнечной радиации.*

*Ключевые слова:* Шпицберген, пролив Фрама, оптические свойства вод, спектральное поглощение, «желтое вещество».

### ВВЕДЕНИЕ

Понимание процессов поглощения и перераспределения солнечной радиации в поверхностном слое океана представляет значительный интерес и необходимо для качественного и количественного описания термодинамических и экосистемных процессов. Недавние исследования продемонстрировали значительный вклад «желтого вещества» (Chromophoric Dissolved Organic Matter – CDOM в англоязычной литературе) в радиационный прогрев верхнего слоя как в центральной Арктике [1], так и ее окраинных морях [1, 7]. Как правило, до последнего времени радиационные процессы рассматривались в терминах интегральной радиации в диапазоне 400–700 нм (Фотосинтетическая активная радиация – ФАР) и без привлечения данных об оптических свойствах взвешенного вещества. В данной работе мы исследуем особенности спектрального поглощения солнечной радиации различными компонентами среды (чистая вода, взвесь и «желтое вещество») и их вклад в суммарное поглощение радиации на различных глубинах.

### РАЙОН РАБОТ

Измерения и отбор проб производились на разрезе вдоль 79° с.ш. в ходе экспедиций «Пролив Фрама-2009» и «Пролив Фрама-2010» на НИС «Лансе» (Норвежский Полярный институт) в сентябре 2009 и 2010 гг. Район работ представлен на рис. 1.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Отбор проб и измерения *in situ*

Пробы для определения содержания «желтого вещества» отбирались из батометров Нискина, емкостью ~ 8 л, во время выполнения океанографических станций. Фильтрация проб осуществлялась с помощью пластикового шприца и прикрепленного к нему двойного фильтра (0,2–0,8 мкм). Профильтрованная вода хранилась в виалах из темного стекла объемом 60 мл при температуре + 4 °С до проведения лабораторного анализа на спектрофотометре (Shimadzu UV-2450).

Пробы для определения оптических свойств взвеси отбирались также из батометров Нискина. Пробы фильтровались через GF/F фильтры (диаметр калиброванных отверстий – 0,4 мкм) диаметром 25 мм. Объем профильтрованной воды зависел от концентрации взвешенного вещества и в среднем составлял 500–1000 мл. Затем фильтры с взвесью помещались в чашки Петри, замораживались и хранились при температуре –80 °С до проведения лабораторного анализа на спектрофотометре.

Вертикальные профили облученности сверху от поверхности до глубины 40 м были получены с помощью гиперспектральных радиометров TriOS RAMSES ACC-2 VIS в диапазоне электромагнитного спектра 320–950 нм. Спектральное разрешение радиометров ~ 3,3 нм. Измерения проводились, как правило, в дневное время и с солнечного борта судна при помощи судового крана и лебедки. Таким образом, датчик был вынесен на расстояние 4–5 м от борта судна, тем самым минимизировался эффект затенения. Более детальное описание приборов и методики наблюдений можно найти в работе [9].

### Лабораторные измерения

Анализ проб для определения содержания «желтого вещества» был проведен в лаборатории Норвежского Полярного института на спектрофотометре Shimadzu UV-2450, следуя методике описанной в работе [14]. Измерялась оптическая плотность проб в диапазоне 240–700 нм с дискретностью 0,5 нм. Ультрочищенная дистиллированная вода Milli-Q использовалась в качестве эталона. Полученные спектральные оптические плотности ( $A_\lambda$ ) были пересчитаны в показатели поглощения ( $a_\lambda$ ) по формуле:

$$a_\lambda = (2,303 \times A_\lambda)/L, \quad (1)$$

где  $L$  – ширина кварцевой кюветы (в нашем случае 0,1 м). Единицы измерения показателей поглощения –  $\text{м}^{-1}$ .

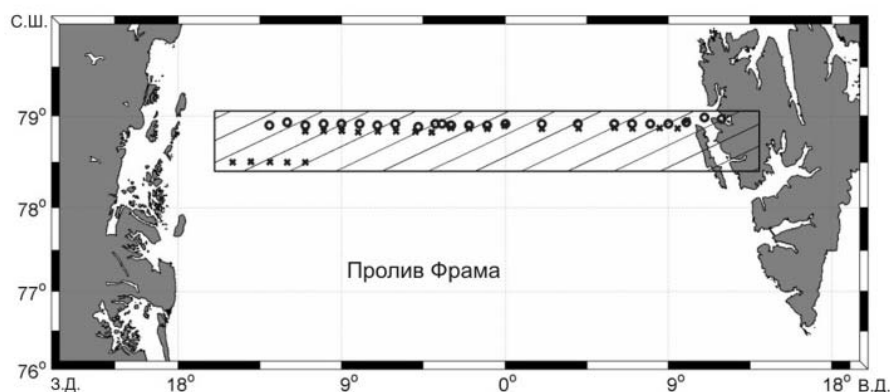


Рис. 1. Карта района работ: экспедиции «Пролив Фрама-2009» (крестики) и «Пролив Фрама-2010» (кружки)

Спектральное поглощение взвешенным веществом (в данном случае суммарное, включающее органическую и неорганическую фракции) было определено в лабораторных условиях спектрометрически с помощью интегрирующей сферы, следуя методике «QFT – Quantitative Filter Technique», изложенной в работе [15]. Полученные значения оптических плотностей фильтров ( $A_\lambda$ ) были преобразованы в показатели поглощения ( $a_\lambda$ ) с использованием следующего уравнение [13]:

$$a_\lambda = \frac{2,303 \times A_\lambda \times AF}{1,603 \times V \times A_\lambda \times \beta_\lambda}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем пробы в  $\text{м}^3$ , а параметры  $AF$  и  $\beta_\lambda$  были оценены, следуя работам [4, 6]. В результате были получены спектральные значения показателя поглощения с размерностью  $\text{м}^{-1}$ .

В данной работе представлен один из наиболее показательных вертикальных профилей подводной облученности, полученных в рамках экспедиции «Пролив Фрама-2009». Указанный профиль представлен на рис. 2. Также нами были отобраны характерные значения спектральных показателей поглощения для «желтого вещества» и взвеси. Значения показателей поглощения чистой морской водой для исследуемого диапазона (350–700 нм) были взяты из литературных источников [12]. Эти три кривые и суммарный показатель поглощения представлены на рис. 3.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Из рис. 2 следует, что с глубиной наблюдаются характерные количественные и качественные изменения спектра облученности. Поглощение на длинах волн более 600 нм обусловлено оптическими свойствами чистой морской воды [2, 3, 10, 12], в то время как в диапазоне длин волн 350–400 нм ослабление облученности объясняется относительно высоким содержанием «желтого вещества» [1, 2, 5]. Наконец, в диапазоне длин волн 480–500 нм наблюдается наибольшая пропускающая способность [2, 3].

Кривые спектральных показателей поглощения, представленные на рис. 3, характеризуются ярко выраженной зависимостью от длины волны. Для спектра поглощения чистой водой характерны низкие значения в видимой части спектра

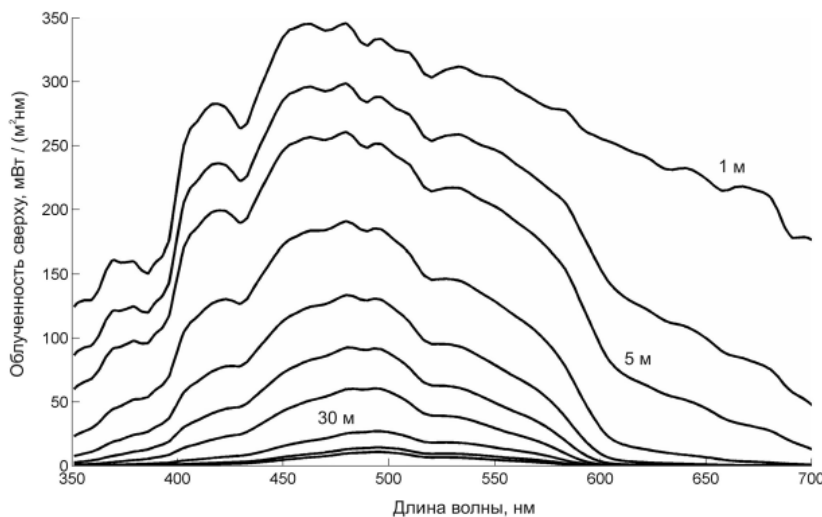


Рис. 2. Распределение облученности сверху с глубиной (цифры у кривых – глубина)

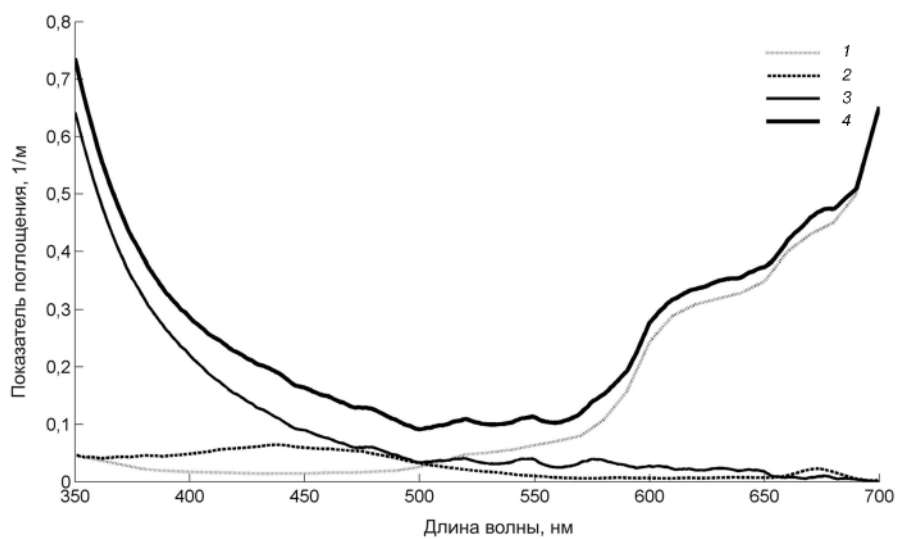


Рис. 3. Типичные спектральные показатели поглощения водой (1), взвесью (2) и «желтым веществом» (3) и суммарное поглощение (4)

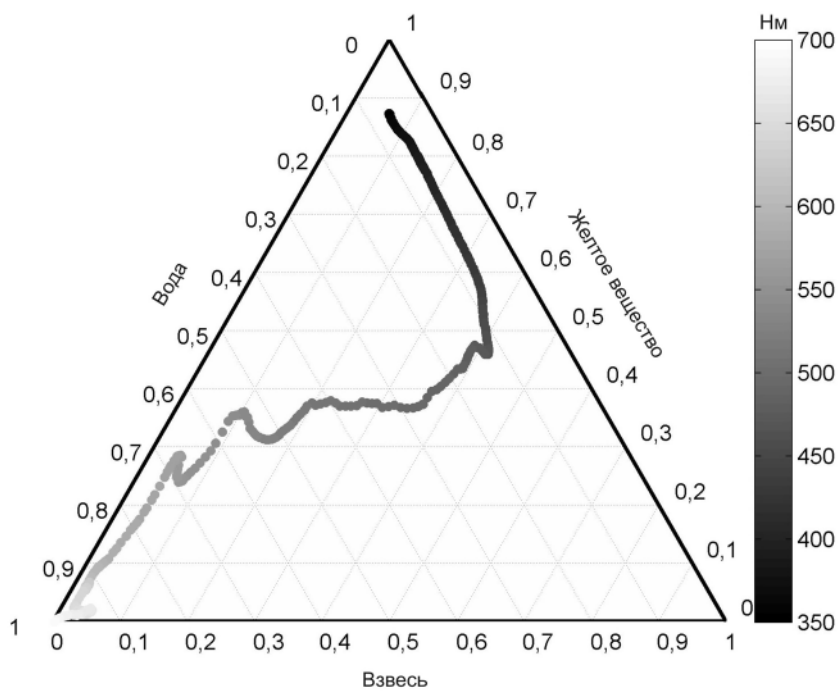


Рис. 4. Относительный вклад в суммарное поглощение трех составляющих: чистая вода, взвесь и «желтое вещество» — в зависимости от длины волны

(< 0,03 м<sup>-1</sup>) и рост поглощения в сторону ближнего инфракрасного диапазона (ИК), с максимальными значениями (> 0,6 м<sup>-1</sup>) на длине волны, равной 700 нм. Для «желтого вещества» наблюдается обратная картина, с минимальными величинами поглощения в диапазоне 600–700 нм и с ростом поглощения при движении к ультрафиолетовой части (УФ) электромагнитного спектра (> 0,6 м<sup>-1</sup> на длине волны 350 нм), что хорошо соответствует результатам, приведенным в работах [1, 5]. Как известно, характерной особенностью спектра поглощения взвешенным веществом являются локальные максимумы около 440 нм и 670 нм [6, 8]. В нашем случае поглощение взвешенным веществом практически на порядок меньше, чем у предыдущих составляющих: воды и «желтого вещества». Это связано с тем, что измерения проводились в осенний период с априори низкой вероятностью интенсивного цветения фитопланктона. Однако, как будет показано далее, даже относительно низкие значения поглощения в районе 440 нм могут вносить значительный вклад в суммарное поглощение на глубинах, где спектр подводной облученности сильно изменен вследствие селективного поглощения.

На рис. 4 представлена иная графическая интерпретация вклада трех составляющих в суммарное поглощение. Так называемая «тернарная диаграмма» показывает относительный вклад (от 0 до 1) чистой воды, взвеси и «желтого вещества» в суммарное поглощение (в данном случае равное 1) в зависимости от рассматриваемой длины волны. Так, видно, что в ближней инфракрасной области спектра суммарное поглощение практически полностью определяется поглощением водой. При движении в сторону коротких длин волн относительный вклад трех компонентов изменяется, и на длине волны 350 нм наибольший вклад в суммарное поглощение вносит «желтое вещество».

Далее мы рассмотрели совместно данные о показателях поглощения и подводной облученности. Мы предположили, что оптические свойства «желтого вещества» и взвеси распределены равномерно от поверхности до глубины 40 м, в то время как оптические свойства чистой воды по определению остаются постоянными с глубиной. Для того чтобы оценить вклад каждой из трех составляющих в суммарное поглощение (350–700 нм) на разных глубинах, мы, следуя работе [8], оценили величину поглощенной радиации, из расчета на единицу времени и объема:

$$E_{abs,i}(\lambda, Z) = E_i(\lambda, Z) \times a_i(\lambda), \quad (3)$$

где  $E_i(\lambda, Z)$  – спектральная облученность сверху на каждом из выбранных горизонтов  $Z$ ;  $a_i(\lambda)$  – спектральные показатели поглощения (см. рис. 3, на котором индекс  $i$  описывает одну из трех составляющих поглощения);  $E_{abs,i}(\lambda, Z)$  – спектральная поглощенная радиация для данной глубины  $Z$  и составляющей  $i$ .

Далее спектральная поглощенная радиация была проинтегрирована во всем рассматриваемом диапазоне длин волн (350–700 нм) для каждого из 10 выбранных горизонтов:

$$E_{abs,i}(Z) = \int_{350 \text{ нм}}^{700 \text{ нм}} E_{abs,i}(\lambda, Z) \times d\lambda. \quad (4)$$

Распределение поглощенной радиации с глубиной представлено на рис. 5а. Из графика видно, что в целом поглощение чистой водой и «желтым веществом» выражено наиболее ярко, особенно в поверхностном слое. Причем вклад трех рассматриваемых составляющих изменяется с глубиной. Для более наглядного представления полученных результатов значения поглощенной радиации каждой из составляющих были нормированы на суммарную поглощенную радиацию (сумма трех составляющих) на каждом из горизонтов согласно формуле:

$$E_{abs,i}(Z) = \frac{E_{abs,i}(Z)}{\sum_i E_{abs,i}(Z)}. \quad (5)$$

Графические результаты приведены на рис. 5б.

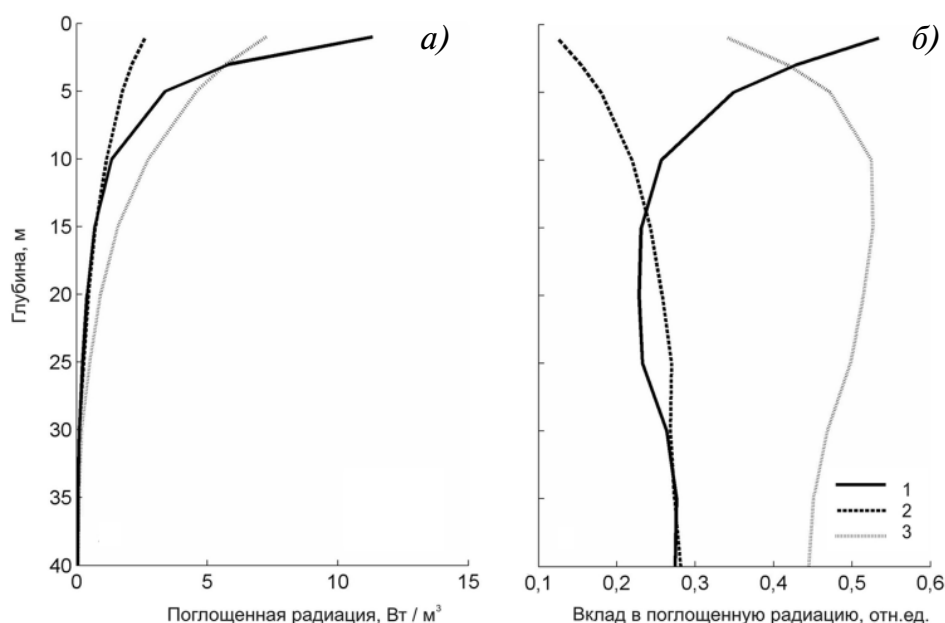


Рис. 5. Вертикальные профили суммарной (350–700 нм) поглощенной радиации для трех составляющих (а); изменение относительного вклада в суммарное поглощение в зависимости от глубины (б)

1 – чистая морская вода, 2 – взвешенное вещество, 3 – «желтое вещество»

Таким образом, расчеты показали, что в поверхностном слое (1–3 м) поглощение чистой водой вносит наибольший вклад, достигая 55 %. В диапазоне глубин 3–40 м уже «желтое вещество» вносит наибольший вклад в суммарное поглощение (более 40 %). Поглощение радиации, вызванное наличием взвешенного вещества, минимально у поверхности (менее 15 %) и растет с глубиной, достигая наибольшего вклада в суммарное поглощение на глубинах порядка 25–40 м (~ 27–28 %). Кроме того, любопытным результатом является тот факт, что в диапазоне глубин 15–30 м количество поглощенной радиации взвешенным веществом превышает значения для чистой воды.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы перераспределения солнечной радиации (350–700 нм) с глубиной были исследованы с точки зрения селективного поглощения. Было показано, что при неизменных абсолютных значениях спектральных показателей поглощения чистой водой, взвесью и «желтым веществом», их вклад в суммарное поглощение значительно варьируется в зависимости от изменений спектрального состава облученности с глубиной.

Подобные зависимости должны быть учтены при рассмотрении процессов таяния морского льда в восточной части пролива Фрама и во фьордах Шпицбергена, а также в спектральных моделях первичной продукции в экосистемах рассматриваемого района.

*Работа выполнена в рамках плановой тематики ЦНТП Росгидромета (раздел 5.3.2) при финансовой поддержке договора между ААНИИ и ФГУП «Трест «Арктик-Уголь», гранта Российско-Норвежской Арктической лаборатории им. Фрама и гранта Норвежского Исследовательского Совета в рамках программы POLRES.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власенков Р.Е., Смирнов А.В., Макитас А.П. Оценка потенциального прогрева поверхностного слоя морей Карского и Лаптевых в 2007 и 2008 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2. С. 35–39.
2. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. М.: Наука, 1981. 279 с.
4. Arbones B., Figueiras F.G. & Zapata M. Determination of phytoplankton absorption co-efficient in natural seawater samples: evidence of a unique equation to correct the pathlength amplification on glass-fiber filters // Marine Ecology Progress Series. 1996. Vol. 137. P. 293–304.
5. Bricaud A., Morel A., Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains // Limnology & Oceanography. 1981. Vol. 26. P. 43–53.
6. Bricaud A., Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea // Limnology & Oceanography. 1990. Vol. 35. P. 562–582.
7. Granskog M.A., Macdonald R.W., Mundy C.-J., Barber D.G. Distribution, characteristics and potential impacts of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Hudson Strait and Hudson Bay, Canada // Continental Shelf Research. 2007. Vol. 27. P. 2032–2050.
8. Morel A. & Antoine D. Heating rate within the upper ocean in relation to its bio-optical state // Journal of Physical Oceanography. 1994. Vol. 24. P. 1652–1665.
9. Nicolaus M., Hudson S.R., Gerland S., Munderloh K. A modern concept for autonomous and continuous measurements of spectral albedo and transmittance of sea ice // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 62. P. 14–28.
10. Ohlmann J.C., Siegel D.A. & Mobley C.D. Ocean radiant heating. Part I: Optical influences // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30. P. 1833–1848.
11. Pegau W.S. Inherent optical properties of the central Arctic surface waters // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107. P. 8035–8042.
12. Smith R.C. & Baker K.S. Optical properties of clearest natural waters // Applied Optics. 1981. Vol. 20. P. 177–174.
13. Staehr P.A. & Markager S. Parameterization of the chlorophyll a-specific in vivo light absorption coefficient covering estuarine, coastal and oceanic waters // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25. P. 5117–5130.
14. Stedmon C.A., Markager S. The optics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Greenland Sea: An algorithm for differentiation between marine and terrestrially derived organic matter // Limnology & Oceanography. 2001. Vol. 46. P. 2087–2093.
15. Tassan S. & Ferrari G.M. A sensitivity analysis of «Transmittance–Reflectance» method for measuring light absorption by aquatic particles // Journal of Plankton Research. 2002. Vol. 24. P. 757–774.

A.K.PAVLOV, B.V.IVANOV, D.M.ZHURAVSKIY, M.A.GRANSKOG, C.A.STEDMON

### ON THE SPECTRAL ABSORPTION OF UNDERWATER IRRADIANCE IN THE FRAM STRAIT

*Data from «in situ» observations of spectral underwater irradiance together with data on spectral absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM), suspended particles and pure water absorption for the Fram Strait are analyzed. A contribution of each of the component to total absorption is estimated. Assuming the absorption coefficients of water, CDOM and particulate matter to be constant with depth, calculations show that relative contribution to total absorption is a significantly depth-dependent. While CDOM and pure water absorption are responsible for the major fraction of light absorption in the uppermost layer, particulate matter contributes more at deeper depths as a consequence of selective absorption of underwater irradiance.*

*Keywords:* Svalbard, Fram Strait, seawater optical properties, spectral absorption, CDOM.