



**МІНЛИВІСТЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА ПІГМЕНТАМИ
ФІТОПЛАНКТОНУ, НЕЖИВОЮ ЗВАЖЕНОЮ ТА ЗАБАРВЛЕНОЮ РОЗЧИНЕНОЮ
ОРГАНІЧНОЮ РЕЧОВИНОЮ ПРИБЕРЕЖНИХ ТА ВІДКРИТИХ ВОД
УКРАЇНСЬКОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ**

Джулай А.О. – м.н.с.

ДУ «Національний антарктичний науковий центр МОН України»

Зотов А.Б. – к.б.н., с.н.с.

ДУ «Інститут морської біології НАН України»

Дикий Є.О. – к.б.н., директор

ДУ «Національний антарктичний науковий центр МОН України»

Мінливість коефіцієнтів поглинання світла пігментами фітопланктону, неживою зваженою речовиною та забарвленою розчиненою органічною речовиною була проаналізована за даними щомісячного біооптичного моніторингу, який проводився в прибережних та відкритих водах в районі м. Севастополь в 2009–2014 рр., а також в північно-західній частині Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в серпні 2011 року.

Дослідження мінливості коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном показало, що в літній період значення коефіцієнтів збільшились в 10 разів при русі з глибоководної частини моря до прибережного району дельти р. Дніпро. В осінній період значення коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном збільшились в 5 разів при русі з глибоководної частини моря до прибережного району дельти р. Дніпро. Дослідження мінливості коефіцієнтів поглинання світла неживою зваженою речовиною показало однакове збільшення величин з глибоководної до прибережної частини Чорного моря в літній та осінній періоди. Дослідження мінливості коефіцієнтів поглинання світла забарвленою розчиненою органічною речовиною в прибережних та відкритих водах української частини Чорного моря показало збільшення величин в 4 рази при русі з глибоководної до прибережної частини Чорного моря в літній період.

Встановлено, що в літній період як в глибоководній частині моря, так і біля берега, більший внесок в загальне поглинання світла вносила забарвлена розчинена органічна речовина, потім йшов внесок поглинання світла фітопланктоном, самим меншим був внесок неживої зваженої речовини.

Було виявлено сезонну та просторову мінливість коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном, неживою зваженою речовиною та забарвленою розчиненою органічною речовиною. Результати дослідження вказують на необхідність використовувати окремі коефіцієнти для прибережних та глибоководних вод Чорного моря, а також розділяти дані по сезонах при використанні алгоритмів розрахунку первинної продукції по супутниковим даним для отримання більш точних результатів.

Ключові слова: коефіцієнти поглинання світла, фітопланктон, нежива зважена речовина, забарвлена розчинена органічна речовина, Чорне море.

Вступ

Розповсюдження світла у водному середовищі та його вплив на біологічну продуктивність водної екосистеми є важливою частиною наукових досліджень вже більше ніж століття (Atkins, and Poole 1933). Особливо актуальними ці дослідження стали у зв'язку з вивченням проблеми глобального потепління. Щоб краще зрозуміти роль океану у глобальному вуглецевому циклі, необхідно покращувати кількісну оцінку продуктивності морських екосистем (Platt et al. 1988, 1995; Sathyendranath et al. 1989;

Platt, and Sathyendranath 1993 a,b; Antoine et al. 1996; Antoine, and Morel 1996; Campbell et al. 2002; Ficek et al. 2003; Woźniak et al. 2003; Carr et al. 2006). Після запуску в космос сканеру кольору прибережної зони (Coastal Zone Color Scanner) стало можливим створення глобальних карт розповсюдження концентрації хлорофілу у верхніх частинах океану, що дозволило краще зрозуміти розповсюдження фітопланктону в океані. Але також стало зрозумілим необхідність валідації супутникових даних та проведення регіональних досліджень (Sathyendranath et al. 2000;

Darecki et al. 2003). Мультиспектральні датчики здатні відображати концентрацію хлорофілу, що є показником біомаси фітопланктону (Mélin, and Hoerffner 2011), шляхом виявлення спектральних змін висхідного випромінювання з водного середовища. Основне використання глобальних карт розповсюдження концентрації хлорофілу полягає в оцінці первинної продукції океану (Behrenfeld et al. 2001).

Існують різні моделі оцінки первинної продукції, для яких використовують супутникові дані. На початку існування сканеру кольору прибережних зон були запропоновані прості статистичні співвідношення для розрахунку первинної продукції на основі концентрації хлорофілу на поверхні моря (Smith, and Baker 1978; Eppley et al. 1985). Такі емпірично отримані алгоритми вважаються корисними при застосуванні усереднених за рік даних (Iverson et al. 2000), але вони недостатньо точні для оцінки первинної продукції для різних сезонів. Поверхнева концентрація хлорофілу пояснює лише 30 % варіабельності первинної продукції в масштабі однієї станції відбору зразків (Balch et al. 1992; Campbell, and O'Reilly 1988). Для покращення якості моделей окрім концентрації хлорофілу використовують сонячну радіацію у видимому діапазоні спектру та коефіцієнти поглинання світла компонентами водного середовища (Platt, and Sathyendranath 1988; Longhurst et al. 1995). До основних компонентів, які поглинають світло у водному середовищі, відносять молекули води, пігменти фітопланктону, неживу зважену речовину, забарвлену розчинену органічну речовину (Mélin, and Hoerffner 2011).

Перші вимірювання спектральних коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном були зроблені в 50-х роках ХХ ст. (Shibata, Benson, and Calvin 1954; Yentsch 1957; Shibata 1958). Через двадцять років подібні вимірювання були проведені в Чорному морі (Коновалов 1979). В цей саме час було доведено, що забарвлена розчинена органічна речовина вносить суттєвий внесок в поглинання світла в морі (Morel, and Prieur 1977). На початку ХХІ ст. розпочались системні дослідження поглинання світла фітопланктоном, неживою зваженою речовиною та кольоровою розчиненою органічною речовиною в різних районах Чорного моря (Чурилова 2001; Чурилова, и Берсенєва 2004; Чурилова, Finenko, and Tugrul 2008). Наведені вище роботи мають низку припущень, одне з яких є – це розділення річного циклу тільки на два сезони – теплий та холодний, які розрізнялись коефіцієнтами, що описують зв'язок між поглинанням світла фітопланктоном та вмістом хлорофілу-*a* в морі (Чурилова, и Джулай 2014). Також описані вище роботи проводились в різних районах Чорного моря та в різні окремі роки. Не проводилось системного багаторічного спостереження за біооптичними характеристиками фітопланктону прибережних районів української частини Чорного моря.

Дана робота була частиною спільного проекту Інституту біології південних морів НАН України та Морського гідрофізичного інституту НАН України, співробітники якого проводили валідацію супутникових знімків за даними вимірювань *in situ*, які частково представлені в даній роботі (Суслин и др. 2014).

Збір та первинний аналіз даних було виконано на базі Інституту біології південних морів НАН України (ІнБІМ) в рамках наукової роботи №: П-5-13 «Використання супутникових даних для біологічного моніторингу Чорного моря» за програмно-цільовою, фундаментальною тематикою «Цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр.» (державний реєстраційний номер роботи 0113U003629). За результатами проведеної роботи було проаналізовано сезонну динаміку концентрації хлорофілу-*a* та коефіцієнтів поглинання світла пігментами фітопланктону в прибережних водах м. Севастополь в період з 2009 по 2010 рр. (Джулай 2011) та міжрічну мінливість вмісту пігментів та поглинання світла фітопланктоном у прибережних водах Чорного моря в районі м. Севастополь в період з 2009 по 2012 рр. (Джулай 2012).

Метою даної роботи є оцінка мінливості коефіцієнтів поглинання світла пігментами фітопланктону, неживою зваженою та забарвленою розчиненою органічною речовиною в прибережних та відкритих водах української частини Чорного моря в період з 2009 по 2014 рр.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом досліджень виступав фітопланктон прибережних та відкритих вод української частини Чорного моря, а саме м. Севастополь, північно-західної частини Чорного моря та вздовж узбережжя Криму.

Дослідження проводились в прибережних водах м. Севастополь у 2009–2014 рр. раз на два тижні в поверхневому шарі вод на трьох станціях: № 1 (44°37'26" N, 33°26'05" E), № 2 (44°37'26" N, 33°30'46" E), № 3 (44°37'01" N, 33°34'20" E) (рис. 1).



Рис. 1. Схема розташування станцій в прибережних та відкритих поверхневих водах в районі м. Севастополь в 2009–2014 рр.

Також дослідження проводились в північно-західній частині Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в серпні 2011 року під час науково-дослідної експедиції на НДС «Професор Водяницький» (рис. 2).

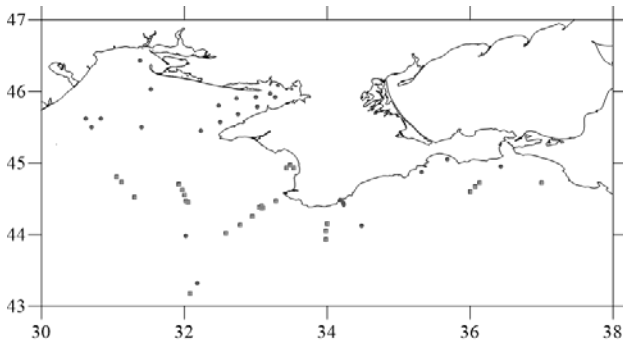


Рис. 2. Схема розташування станцій в північно-західній частині Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в серпні 2011 року

Визначення коефіцієнтів поглинання світла неживою зваженою речовиною та пігментами фітопланктону.

Проби фітопланктону об'ємом від 500 до 2000 мл осаджували на скловолокнисті фільтри (*GF/F*) (*Whatman*) при вакуумі не більше 0,2 атм. Оптичні вимірювання проводили відразу ж після фільтрації на двопробеному спектрофотометрі *Specord-M40* (*Carl Zeiss Jena*) в діапазоні довжин хвиль λ від 400 до 750 нм. Спектральні виміри виконувались за стандартною методикою «кількісного визначення на зволжених фільтрах» («*Quantitative Filter Technique*») (Yentsch 1962; Mitchell, and Kiefer 1988). У формулі розрахунку коефіцієнтів враховувався об'єм профільтрованої проби.

Визначення коефіцієнтів поглинання світла забарвленою розчиненою органічною речовиною.

Проби об'ємом 100 мл фільтрували через целулоїдні фільтри *Millipore* (*M/F*) з діаметром пор 0,2 мкм фільтрацією при вакуумі не більше 0,2 атм. Оптичну щільність отриманого фільтрату визначали на двопробеному спектрофотометрі *Specord-M40* (*Carl Zeiss Jena*). Виміри виконувались згідно протоколу *NASA* (Twardowski, Röttgers, and Stramski 2018).

Результати та обговорення

Були отримані спектри поглинання світла пігментами фітопланктону на станціях № 1–3 полігону в районі м. Севастополь. На спектрах можна виділити два основних піка: в синій (440 нм) та червоній (678 нм) областях спектра. На довжині хвилі 440 нм світло поглинає хлорофіл-*a*, продукти його розпаду і допоміжні пігменти. Пік на довжині хвилі 678 нм відповідає поглинанню світла тільки хлорофілом-*a* та продуктами його розпаду (Jeffrey, Mantoura, and Wright 1997). Крім двох основних максимумів поглинання світла, на всіх спектрах спо-

стерігалось локальне поглинання світла на довжині хвилі поблизу 465 нм, що відповідало поглинанню світла допоміжними пігментами.

Протягом року спостерігалась зміна величин коефіцієнтів поглинання світла пігментами фітопланктону та форми їх спектрів. Для оцінки мінливості форми спектрів було проведено нормування спектрів на довжині хвилі 678 нм.

На ст. № 1 відзначений локальний максимум поглинання світла був більш помітним, ніж на станціях, розташованих в бухті (рис. 3). Це можна пов'язати з тим, що у фітопланктоні, який розвивався в більш прозорих відкритих водах, знаходився більший відсоток допоміжних фотопротекторних пігментів влітку та світлозбираючих пігментів взимку, ніж у фітопланктоні в бухті.

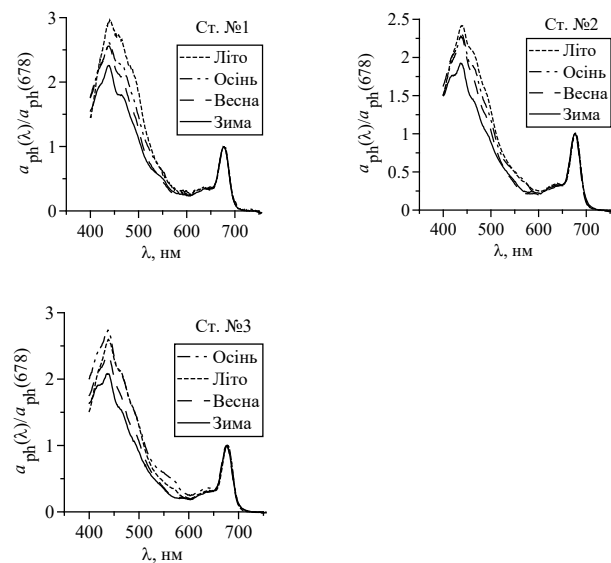


Рис. 3. Спектральний розподіл нормованих на довжині хвилі 678 нм коефіцієнтів поглинання світла пігментами фітопланктону на станціях № 1–3 полігону в районі м. Севастополь по сезонах в 2009-2014 рр.

Окрім пігментів фітопланктону світло також поглинає нежива зважена речовина (a_{NAP} , M^{-1}) і забарвлена розчинена органічна речовина (a_{CDOM} , M^{-1}). Спектри поглинання цих біооптичних характеристик наведені на рисунку 4.

Із рисунка 4 видно, що в літній період як в глибоководній частині моря, так і біля берега на довжині хвилі 440 нм більший внесок в загальне поглинання світла вносила забарвлена розчинена органічна речовина, потім йшов внесок поглинання світла фітопланктоном, самим меншим був внесок неживої зваженої речовини. Якщо порівнювати відкриті води напроти м. Севастополь на відстані 100 км і прибережні води в районі дельти р. Дніпро, то видно, що величина a_{CDOM} збільшилась в 4 рази, a_{ph} та a_{NAP} – в 10 разів (рис. 5, 6).

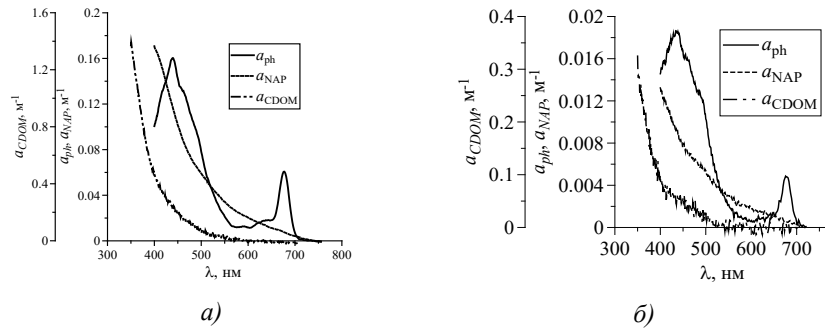


Рис. 4. Спектри поглинання світла фітопланктоном ($a_{ph}(\lambda)$, m^{-1}), неживою зваженою ($a_{NAP}(\lambda)$, m^{-1}) і забарвленою розчищеною органічною ($a_{CDOM}(\lambda)$, m^{-1}) речовиною, які були отримані в літній період в поверхневому шарі біля берега (дельта р. Дніпр) (а) та в глибоководній частині моря (приблизно 100 км від м. Севастополь) (б)

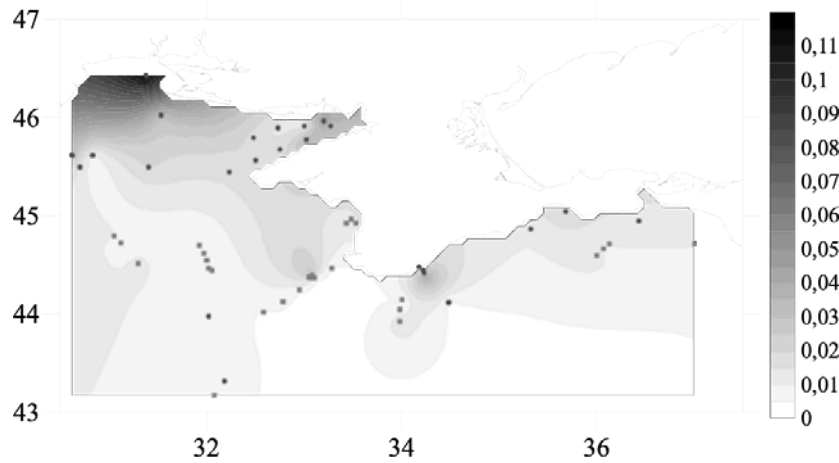


Рис. 5. Просторова мінливість коефіцієнтів поглинання світла неживою зваженою речовиною ($a_{NAP}(440)$, m^{-1}) північно-західної частини Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в серпні 2011 року

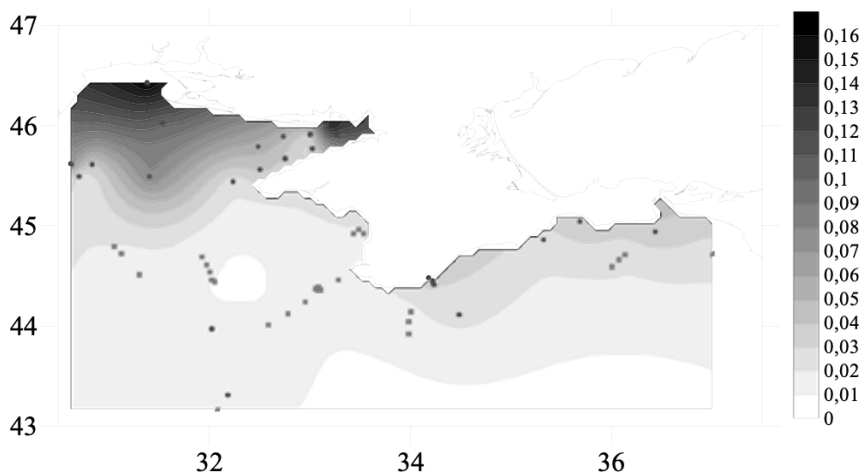


Рис. 6. Просторова мінливість коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном ($a_{ph}(440)$, m^{-1}) північно-західної частини Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в серпні 2011 року

В осінній період коефіцієнти поглинання світла фітопланктоном змінювались приблизно в 5 разів при русі від глибоководної частини моря до берега (рис. 7).

Інша картина спостерігалась в осінній період при визначенні коефіцієнтів поглинання світла неживою зваженою речовиною, які змінювались приблизно в 9–10 разів при русі від глибоководної частини моря до берега (рис. 8).

В період з 2011 по 2012 роки проводилось вимірювання коефіцієнтів поглинання світла забарвленою розчищеною органічною речовиною ($a_{CDOM}(\lambda)$) в районі м. Севастополь. Отримані спектри поглинання світла були усереднені по станціям полігону (рис. 9).

Були отримані рівняння, які описують спектральний розподіл коефіцієнтів поглинання світла забарвленою розчищеною органічною речовиною ($a_{CDOM}(\lambda)$), які були усереднені по станціям полігону в районі м. Севастополь за 2011–2012 роки досліджень:

Ст. № 1: $a_{CDOM}(440) = e^{(-0,22*\lambda)} * 1016$, $R^2 = 0,98$ (1)

Ст. № 2: $a_{CDOM}(440) = e^{(-0,22*\lambda)} * 1242$, $R^2 = 0,97$ (2)

Ст. № 3: $a_{CDOM}(440) = e^{(-0,21*\lambda)} * 1334$, $R^2 = 0,94$ (3),

де $a_{CDOM}(440)$ – коефіцієнт поглинання світла забарвленою розчищеною органічною речовиною на довжині хвилі 440 нм, m^{-1} ; λ – довжина хвилі, нм; R^2 – коефіцієнт детермінації.

З рівнянь 1–3 видно, що більше світла поглинала забарвлена розчинена органічна речовина, яка знаходилась в кутовій частині бухти (ст. № 3), ніж в двомильній зоні від берега (ст. № 1). Це можна пов'язати з вітровою активністю, яка супроводжувалась горизонтальною адвекцією вод, що призводило, в залежності від напрямку вітру, або до проникнення більш «бідних» морських вод в бухту, що містять менше біогенних речовин, або до виносу «багатих» вод з бухти (Іванов, Овсянний, и Репетин 2006). Ст. № 1 внаслідок свого віддаленого розташування від берега в меншій мірі піддавалась впливу річкового і побутових стоків, які розповсюджувались під час руху водних мас.

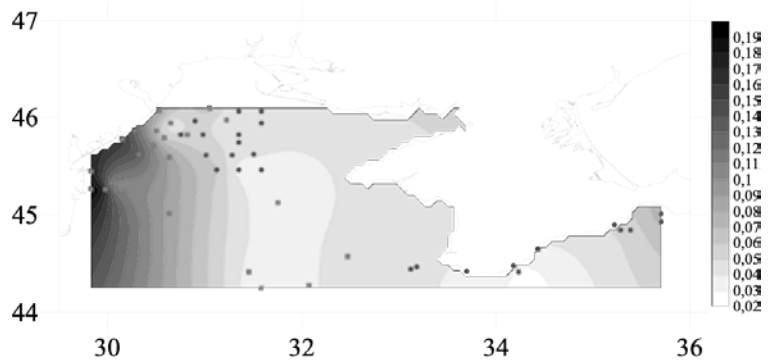


Рис. 7. Просторова мінливість коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном ($a_{ph}(440)$, m^{-1}) північно-західної частини Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в жовтні–листопаді 2010 року

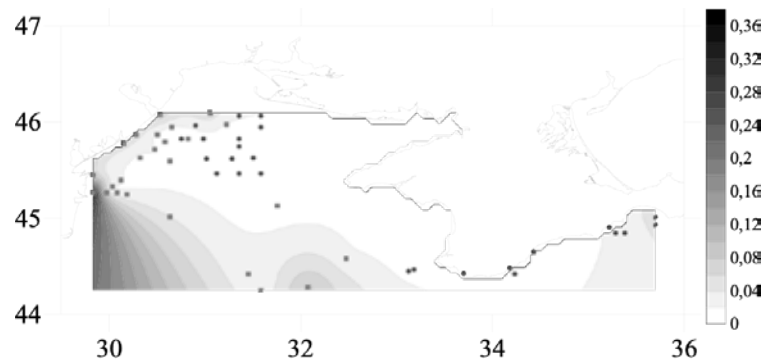


Рис. 8. Просторова мінливість коефіцієнтів поглинання світла неживою зваженою речовиною ($a_{NAP}(440)$, m^{-1}) північно-західної частини Чорного моря та вздовж узбережжя Криму в жовтні–листопаді 2010 року

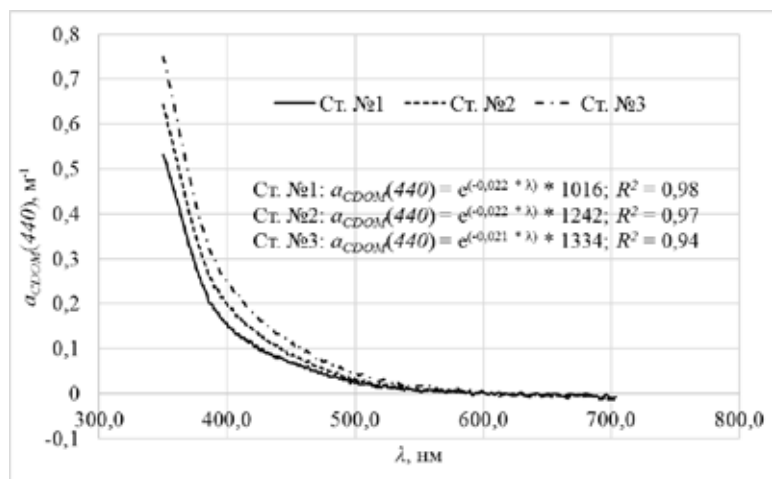


Рис. 9. Спектральний розподіл коефіцієнтів поглинання світла забарвленою розчищеною органічною речовиною ($a_{CDOM}(\lambda)$), які були усереднені по станціям № 1–3 полігону в районі м. Севастополь від довжини хвилі (λ) в 2011–2012 рр.

Висновки

Було виявлено сезонну та просторову мінливість коефіцієнтів поглинання світла фітопланктоном, неживою зваженою речовиною та забарвленою розчиненою органічною речовиною. Результати дослідження вказують на необхідність

використовувати окремі коефіцієнти для прибережних та глибоководних вод Чорного моря, а також розділяти дані по сезонах при використанні алгоритмів розрахунку первинної продукції по супутниковим даним для отримання більш точних результатів.

Список використаних джерел

1. Джулай, А.О. Межгодовая изменчивость содержания пигментов и поглощения света фитопланктоном в прибрежных водах Чёрного моря в районе Севастополя. *Экосистемы, их оптимизация и охрана*. 2012. 7. С. 179–190.
2. Джулай, А.О. Сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» и поглощения света пигментами фитопланктона в прибрежных водах Севастополя (2009–2010 гг.). *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. 25. С. 357–369.
3. Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2006. 90 с.
4. Коновалов Б.В. Некоторые особенности спектрального поглощения взвеси морской воды. *Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов*. Новосибирск: Наука, 1979. С. 58–65.
5. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Джулай А.О., Мончева С., Слабакова В., Кривенко О.В., Сфимова Т.В., Салюк П.А. Региональный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла «а» и коэффициента поглощения света неживым органическим веществом на длине волны 490 нм в Черном море для спектральных каналов цветковых сканеров MODIS и MERIS. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. 28. С. 303–319.
6. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла а в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS. *Морской экологический журнал*. 2008. 2. С. 24–42.
7. Чурилова Т.Я. Поглощение света фитопланктоном и детритом в Чёрном море в весенний период. *Океанология*. 2001. 41(5). С. 719–727.
8. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В., Брянцева Ю.В. Био-оптические характеристики фитопланктона в период зимне-весеннего «цветения» в Черном море. *Морской гидрофизический журнал*. 2001. 5. С. 28–40.
9. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П. Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль–август 2002). *Морской гидрофизический журнал*. 2004. 4. С. 39–50.
10. Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В. Изменчивость биотических характеристик фитопланктона в Черном море. *Океанология*. 2004. 44 (2). С. 208–221.
11. Чурилова Т.Я., Джулай А.О., Суслин В.В., Кривенко О.В., Сфимова Т.В., Муханов В.С., Рилькова О.О., Манжос Л.О. Биооптические показатели вод глубоководной части Черного моря: параметризация поглощения света фитопланктоном в летний и осенний периоды. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. 28. С. 320–333.
12. Antoine D., Andr'e J.M., Morel A. Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. 10 (1). P. 56–69.
13. Antoine D., Morel A. Oceanic primary production: 1. Adaptation of spectral light-photosynthesis model in view of application to satellite chlorophyll observations. *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. 10 (1). P. 42–55.
14. Atkins W.R.G., Poole H.H. The Photo-Electric Measurement of the Penetration of Light of various Wave-Lengths into the Sea and the Physiological Bearing of the Results. *Philosophical transactions of the royal society of London*. 1933. Vol. CCXXN. B 487. PP. 129–164.
15. Balch W.M., Evans R., Brown J., Feldman G., McClain C., Esaias W. The remote sensing of ocean primary productivity: Use of a new data compilation to test satellite algorithms. *Journal of Geophysical Research*. 1992. 97. P. 2279–2293.
16. Behrenfeld M., Randerson J., McClain C., Feldman G., Los S., Tucker C., Falkowski P., Field C., Frouin R., Esaias W., Kolber D., Pollack N. Temporal variations in the photosynthetic biosphere. *Science*. 2001. 291. P. 2594–2597.
17. Campbell J., Antoine D., Armstrong R., Arrigo K., Balch W., Barber R., Behrenfeld M., Bidigare R., Bishop J., Carr M.-E., Esaias W., Falkowski P., Hoepffner N., Iverson R., Kieffer D., Lohrenz S., Marra J., Morel A., Ryan J., Vedernikov V., Waters K., Yentsch C., Yoder J. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. 16 (3). P. 74–75.
18. Campbell J.W., O'Reilly J.E. Role of satellites in estimating primary productivity on the northwest Atlantic continental shelf. *Continental Shelf Research*. 1988. 8(2). P. 179–204.
19. Carr M.-E., Friedrichs M.A.M., Schmeltz M., Aita M.N., Antoine D., Arrigo K.R., Asanuma I., Aumont O., Barber R., Behrenfeld M., Bidigare R., Buitenhuis E.T.,

- Campbell J., Ciotti A., Dierssen H., Dowell M., Dunne J., Esaias W., Gentili B., Gregg W., Groom S., Hoepffner N., Ishizaka J., Kameda T., Le Quere C., Lohrenz S., Marra J., Melin F., Moore K., Morel A., Reddy T.E., Ryan J., Scardi M., Smyth T., Turpie K., Tilstone G., Waters K., Yamanaka Y. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. *Deep-Sea Research*. 2006. 53. P. 741–770.
20. Darecki M., Weeks A., Sagan S., Kowalczyk P., Kaczmarek S. Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*. 2003. 23 (3–4). P. 237–250.
21. Eppley R., Stewart W. E., Abbot R. M., Heyman V. Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll, introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. *Journal Plankton Research*. 1985. 7. P. 57–70.
22. Ficek Z., Tana R. Entanglement induced by spontaneous emission in spatially extended two-atom systems. *Journal of modern optics*. 2003. 50. P. 2765–2779.
23. Iverson R.L., Esaias W.E., Turpie K. Ocean annual phytoplankton carbon and new production, and annual export production estimated with empirical equations and CZCS data. *Global Change Biology*. 2000. 6. P. 57–72.
24. Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Wright S.W. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *UNESCO publishing*. 1997. P. 661.
25. Kopelevich O.V., Burenkov V.I. Relation between the spectral values of the light absorption coefficients of sea water, phytoplanktonic pigments, and yellow substance. *Oceanology*. 1977. 17. P. 278–282.
26. Longhurst A., Sathyendranath S., Platt T., Caverhill C. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal Plankton Research*. 1995. 17. P. 1245–1271.
27. Mélin F., Hoepffner N. Monitoring Phytoplankton Productivity from Satellite—An Aid to Marine Resources Management. *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management* / edited by Morales J., Stuart V., Platt T., Sathyendranath S. EU PRESPO and IOCCG. 2011. P. 79–93.
28. Mitchell B.G., Kiefer D.A. Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light limited phytoplankton. *Deep-Sea Research*. 1988. 35 (5). P. 639–663.
29. Mitchell B.G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT). *Ocean Optics X*. 1990. 1302. P. 137–148.
30. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. 1977. 22. P. 709–722.
31. Morel A. Light and marine photosynthesis: A spectral model with geochemical and climatological implications. *Progress in Oceanography*. 1991. 26. P. 263–306.
32. O'Reilly J.E., Maritorena S.M., O'Brien C., Siegel D.A., Toole D., Menzies D., Smith R.C. SeaWiFS postlaunch Calibration and Validation Analyses. In Part 3. *NASA Technical Memorandum*. 206892, edited by S. B. Hooker and E. R. Firestone. 2000. No 11. – P. 49.
33. Platt T., Sathyendranath S. Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*. 1988. 241. P. 1613–1620.
34. Platt T., Sathyendranath S. Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1993a. 98 (C8). P. 14561–14576.
35. Platt T., Sathyendranath S. The remote sensing of ocean primary productivity – use of a new data compilation to test satellite algorithms – comment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1993b. 98. P. 16583–16584.
36. Platt T., Sathyendranath S., Longhurst A. Remote-sensing of primary production in the ocean – promise and fulfilment. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*. 1995. 348(1324). P. 191–201.
37. Sathyendranath S., Platt T., Cavarhill C.M., Warnock R.E., Lewis M.R. Remote sensing of oceanic primary production: computations using a spectral model. *Deep-Sea Research*. 1989. 36 (3). P. 431–453.
38. Sathyendranath S., Platt T., Stuart V. Remote sensing of ocean colour: Recent advances, exciting possibilities and unanswered questions. *5th Pacific Ocean Remote Sens. Conf. (PORSEC): Proceedings*, Dona Paula, Goa, 5–8 Dec. 2000. Vol. 1. P. 6.
39. Shibata K., Benson A.A., Calvin M. The absorption spectra of suspension of living micro-organisms. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1954. 15. P. 461–470.
40. Shibata K. Spectrophotometry of intact biological materials, absolute and relative measurements of their transmission, reflection, and absorption spectra. *Journal of Biochemistry*. 1958. 45. P. 599–623.
41. Smith R.C., Baker K.S. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnology and Oceanography*. 1978. 23. P. 247–259.
42. Twardowski M., Röttgers R., Stramski D. The absorption Coefficient, An Overview. *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. Dartmouth, NS, Canada. Vol. 1.0: Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient. 2018. Ch. 1. P. 1–17.
43. Wozniak B., Dera J., Ficek D., Majchrowski R., Ostrowska M., Kaczmarek S. Modelling light and photosynthesis in the marine environment. *Oceanologia*. 2003. 45(2). P. 171–245.
44. Yentsch C.S. A non-extractive method for the quantitative estimation of chlorophyll in algal cultures. *Nature*. 1957. 179. P. 1302–1304.
45. Yentsch C.S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnology and Oceanography*. 1962. 7. P. 207–217.
46. <http://blackseacolor.com>.

References

1. Dzhulai, A.O. (2012). Mezhdogodovaya izmenchivost' sodержaniya pigmentov i pogloshcheniya sveta fitoplanktonom v pribrezhnykh vodakh Chernogo morya v rayone Sevastopolya [Interannual variability of pigment content and light absorption by phytoplankton in the coastal waters of the Black Sea near Sevastopol]. *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana – Ecosystems, their optimization and protection*, 7, 179–190 [in Russian].
2. Dzhulai, A.O. (2011). Sezonnaya dinamika kontsentratsii khlorofilla «a» i pogloshcheniya sveta pigmentami fitoplanktona v pribrezhnykh vodakh Sevastopolya (2009–2010 gg.) [Seasonal dynamics of chlorophyll "a" concentration and light absorption by phytoplankton pigments in the coastal waters of Sevastopol (2009–2010)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 25, 357–369 [in Russian].
3. Ivanov, V.A., Ovsianyi, E.I., & Repetin, L.N. (2006). *Gidrologo-gidrokhimicheskii rezhim Sevastopolskoi bukhty i ego izmeneniia pod vozdeistviem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [Hydrological and hydrochemical regime of the Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors]*. Sevastopol: NPC «EKOSI-Gidrofizika» [in Russian].
4. Kononov, B.V. (1979). Nekotoryye osobennosti spektral'nogo pogloshcheniya vzvesi morskoy vody [Some Features of the Spectral Absorption of Suspended Sea Water]. *Opticheskiye metody izucheniya okeanov i vnutrennikh vodoyemov*. (pp. 58–65). Novosibirsk: Nauka [in Russian].
5. Suslin, V.V., Churilova, T.Ya., Dzhulai, A.O., Moncheva, S., Slabakova, V., Krivenko, O.V. et al. (2014). Regional'nyy algoritm vosstanovleniya kontsentratsii khlorofilla «a» i koeffitsiyenta pogloshcheniya sveta nezhyvym organicheskim veshchestvom na dline volny 490 nm v Chernom more dlya spektral'nykh kanalov tsvetovykh skanerov MODIS i MERIS [Regional algorithm for reconstructing the concentration of chlorophyll "a" and the coefficient of absorption of light by inanimate organic matter at a wavelength of 490 nm in the Black Sea for the spectral channels of the MODIS and MERIS color scanners]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 28, 303–319 [in Russian].
6. Suslin, V.V., Churilova, T.Ia., & Sosik, Kh.M. (2008). Regionalnyi algoritm rascheta kontcentratsii khlorofilla a v Chernom more po sputnikovym dannym SeaWiFS [Regional algorithm for calculating the concentration of chlorophyll a in the Black Sea using satellite data SeaWiFS]. *Morskoi ekologicheskii zhurnal – Marine ecological journal*, 2, 24–42 [in Russian].
7. Churilova, T.Ya. (2001). Pogloshcheniye sveta fitoplanktonom i detritom v Chernom more v vesenni period [Light absorption by phytoplankton and detritus in the Black Sea in spring]. *Oceanologia – Oceanology*, 41 (5), 719–727 [in Russian].
8. Churilova, T.Ya., Berseneva, G.P., Georgieva, L.V., & Bryantseva, Yu.V. (2001). Bio-opticheskiye kharakteristiki fitoplanktona v period zimne-vesennego «tsveteniya» v Chernom more [Bio-optical characteristics of phytoplankton during the winter-spring "bloom" in the Black Sea]. *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal – Marine Hydrophysical Journal*, 5, 28–40 [in Russian].
9. Churilova, T.Ya., & Berseneva, G.P. (2004). Pogloshcheniye sveta fitoplanktonom, detritom i rastvorenyim organicheskim veshchestvom v pribrezhnom rayone Chernogo morya (iyul'–avgust 2002) [Light absorption by phytoplankton, detritus and dissolved organic matter in the coastal area of the Black Sea (July–August 2002)]. *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal – Marine Hydrophysical Journal*, 4, 39–50 [in Russian].
10. Churilova, T.Ya., Berseneva, G.P., & Georgieva, L.V. (2004). Izmenchivost' bioticheskikh kharakteristik fitoplanktona v Chernom more [Variability of the biotic characteristics of phytoplankton in the Black Sea]. *Oceanologia – Oceanology*, 44 (2), 208–221 [in Russian].
11. Churilova, T.Ya., Dzhulai, A.O., Suslin, V.V., Krivenko, O.V., Efimova, T.V., Mukhanov, V.S. et al. (2014). Bioopticheskiye pokazateli vod glubokovodnoy chasti Chernogo morya: parametrizatsiya pogloshcheniya sveta fitoplanktonom v letniy i osenni periody [Biooptical indicators of the waters of the deep part of the Black Sea: parametrization of light absorption by phytoplankton in summer and autumn periods]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa – Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 28, 320–333 [in Russian].
12. Antoine, D., Andr'e, J.M., & Morel, A. (1996). Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (1), 56–69.
13. Antoine, D., & Morel, A. (1996). Oceanic primary production: 1. Adaptation of spectral light-photosynthesis model in view of application to satellite chlorophyll observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (1), 42–55.
14. Atkins, W.R.G., & Poole, H.H. (1933). The Photo-Electric Measurement of the Penetration of Light of various Wave-Lengths into the Sea and the Physiological Bearing of the Results. *Philosophical transactions of the royal society of London, CCXXN (B 487)*, 129–164.
15. Balch, W.M., Evans, R., Brown, J., Feldman G., McClain C., & Esaias W. (1992). The remote sensing of ocean primary productivity: Use of a new data compilation to test satellite algorithms. *Journal of Geophysical Research*, 97, 2279–2293.
16. Behrenfeld, M., Randerson, J., McClain, C., Feldman, G., Los, S., Tucker, C. et al. (2001). Temporal variations in the photosynthetic biosphere. *Science*, 291, 2594–2597.
17. Campbell, J., Antoine, D., Armstrong, R., Arrigo, K., Balch, W., Barber, R. et al. (2002). Comparison

- of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (3), 74–75.
18. Campbell, J.W., & O'Reilly, J.E. (1988). Role of satellites in estimating primary productivity on the northwest Atlantic continental shelf. *Continental Shelf Research*, 8(2), 179–204.
19. Carr, M-E., Friedrichs, M.A.M., Schmeltz, M., Aita, M.N., Antoine, D., Arrigo, K.R. et al. (2006). A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. *Deep-Sea Research*, 53, 741–770.
20. Darecki, M., Weeks, A., Sagan, S., Kowalczyk, P., & Kaczmarek, S. (2003). Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*, 23 (3-4), 237–250.
21. Eppley, R., Stewart, W.E., Abbot, R.M., & Heyman, V. (1985). Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll, introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. *Journal Plankton Research*, 7, 57–70.
22. Ficek, Z., & Tana, R. (2003). Entanglement induced by spontaneous emission in spatially extended two-atom systems. *Journal of modern optics*, 50, 2765–2779.
23. Iverson, R.L., Esaias, W.E., & Turpie, K. (2000). Ocean annual phytoplankton carbon and new production, and annual export production estimated with empirical equations and CZCS data. *Global Change Biology*, 6, 57–72.
24. Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., & Wright, S.W. (1997). Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *UNESCO publishing*, 661.
25. Kopelevich, O.V., & Burenkov, V.I. (1977). Relation between the spectral values of the light absorption coefficients of sea water, phytoplanktonic pigments, and yellow substance. *Oceanology*, 17, 278–282.
26. Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T., & Caverhill, C. (1995). An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal Plankton Research*, 17, 1245–1271.
27. Mélin, F., & Hoepffner, N. (2011). Monitoring Phytoplankton Productivity from Satellite—An Aid to Marine Resources Management. *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management*. (pp. 79-93). EU PRESPO and IOCCG.
28. Mitchell, B.G., & Kiefer, D.A. (1988). Chlorophyll a specific absorption and fluorescence excitation spectra for light limited phytoplankton. *Deep-Sea Research*, 35(5), 639–663.
29. Mitchell, B.G. (1990). Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT). *Ocean Optics X*, 1302, 137–148.
30. Morel, A. & Prieur, L. (1991). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22, 709–722.
31. Morel, A. (1991). Light and marine photosynthesis: A spectral model with geochemical and climatological implications. *Progress in Oceanography*, 26, 263–306.
32. O'Reilly, J.E., Maritorena, S.M., O'Brien, C., Siegal, D.A., Toole, D., Menzies, D., Smith, R.C. (2000). SeaWiFS postlaunch Calibration and Validation Analyses. In Part 3. *NASA Technical Memorandum*. 206892, edited by S. B. Hooker and E. R. Firestone, 11, 49 [in English].
33. Platt, T., & Sathyendranath, S. (1988). Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*, 241, 1613–1620.
34. Platt, T., & Sathyendranath, S. (1993a). Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98 (C8), 14561–14576.
35. Platt, T., & Sathyendranath, S. (1993b). The remote sensing of ocean primary productivity – use of a new data compilation to test satellite algorithms – comment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98, 16583–16584.
36. Platt, T., Sathyendranath, S., & Longhurst, A. (1995). Remote-sensing of primary production in the ocean – promise and fulfilment. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 348(1324), 191–201.
37. Sathyendranath, S., Platt, T., Cavarhill, C.M., Warnock, R.E., & Lewis, M.R. (1989). Remote sensing of oceanic primary production: computations using a spectral model. *Deep-Sea Research*, 36(3), 431–453.
38. Sathyendranath, S., Platt, T., & Stuart, V. (2000). Remote sensing of ocean colour: Recent advances, exciting possibilities and unanswered questions. *Proceedings from: 5th Pacific Ocean Remote Sens. Conf. (PORSEC)*. (p. 6). Dona Paula, Goa.
39. Shibata, K., Benson, A., & Calvin, M. (1954). The absorption spectra of suspension of living microorganisms. *Biochimica et Biophysica Acta*, 15, 461–470.
40. Shibata, K. (1958). Spectrophotometry of intact biological materials, absolute and relative measurements of their transmission, reflection, and absorption spectra. *Journal of Biochemistry*, 45, 599–623.
41. Smith, R.C., & Baker, K.S. (1978). The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 23, 247–259.
42. Twardowski, M., Röttgers, R., & Stramski, D. (2018). The absorption Coefficient, An Overview. *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. Dartmouth, NS, Canada. Vol. 1.0: *Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient*. Ch. 1, 1–17.
43. Wozniak, B., Dera, J., Ficek, D., Majchrowski, R., Ostrowska, M., & Kaczmarek, S. (2003). Modelling light and photosynthesis in the marine environment. *Oceanologia*, 45(2), 171–245.
44. Yentsch, C.S. (1957). A non-extractive method for the quantitative estimation of chlorophyll in algal cultures. *Nature*, 179, 1302–1304.
45. Yentsch, C.S. (1962). Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 7, 207–217.
46. <http://blackseacolor.com>.

**VARIABILITY OF LIGHT ABSORPTION BY PHYTOPLANKTON PIGMENTS,
NON-ALGAL PARTICLES AND COLORED DISSOLVED ORGANIC MATTER
OF COASTAL AND OPEN WATERS OF THE UKRAINIAN PART OF THE BLACK SEA**

Dzhulai A.O., Junior researcher

National Antarctic Scientific Center of Ukraine

Zotov A.B., PhD, Senior researcher

Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine

Dykyi E.O., PhD, Director

National Antarctic Scientific Center of Ukraine

Variability of light absorption by phytoplankton pigments, non-algal particles and colored dissolved organic matter was analyzed by monthly bio-optical monitoring of coastal and deep waters near Sevastopol in 2009–2014 and by sampling in northwestern part of the Black Sea and along the Crimean coast in August 2011.

Light absorption coefficients by phytoplankton were in 10 times bigger in coastal zone near Dnieper Delta compared with deep part of the sea in summer. In autumn light absorption coefficients by phytoplankton were in 5 times bigger in coastal zone near Dnieper Delta compared with deep part of the sea. Light absorption coefficients by non-algal particles in deep water and in coastal zone equally increased in summer and in autumn. Light absorption coefficients by colored dissolved organic matter were in 4 times bigger in coastal zone compared with deep part of the sea in summer.

It was found that in summer, both in deep water and near the coast, the main contribution to the total light absorption was made by colored dissolved organic matter, smaller contribution was made by phytoplankton, the smallest contribution was made by non-algal particles.

Seasonal and spatial variability of light absorption coefficients by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter was found. It is necessary to separate data from coastal and deep waters of the Black Sea, as well as to divide data by seasons to obtain better results when calculating primary production by using satellite data.

Key words: light absorption, phytoplankton, non-algal particles, colored dissolved organic matter, Black Sea.