

УДК (577.1+547.979.7):579:574.582(269)

## АТФ И ХЛОРОФИЛЛ $\alpha$ МИКРОПЛАНКТОНА В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД В РАННИЙ ОСЕННИЙ СЕЗОН 2002 Г.

А.А. Сысоев

*Институт биологии Южных морей НАН Украины. Севастополь, проспект Нахимова, 2*

**Реферат.** Изучение АТФ и хлорофилла  $\alpha$  как индексов метаболически активной биомассы и автотрофной составляющей микропланктона показало неоднородный характер распределения исследуемых параметров. Различия достигали величины порядка. Высокая вариабельность распределения биохимических параметров проявилась в четкой зависимости от гидрологических и топографических особенностей исследуемых зон. Высокие концентрации, соответствующие эвтрофным критериям, отмечены на севере и западе полигона, где ощутимо влияние вод пролива Дрейка и моря Беллинсгаузена. Низкие показатели, близкие по значению к олиготрофным, зафиксированы в южной части полигона, подверженной влиянию вод моря Уэдделла. В соответствии с автотрофным индексом в средней части полигона обширная акватория содержала паритетные биомассы авто- и гетеротрофного микропланктона, в то время как периферийные участки, в особенности на северо-западе, содержали автотрофную доминанту. Размерно-структурный анализ показал доминирование биомассы крупных фракций в эвфотической зоне и тенденции к росту доли мелкой составляющей микропланктона с возрастанием глубины на периферийных участках полигона.

**АТФ і хлорофіл  $\alpha$  мікропланктону в протоці Брансфілд у ранній осінній сезон 2002 р.** А.А. Сисоєв

**Реферат.** Вивчення АТФ і хлорофілу  $\alpha$  як індексів метаболічно активної біомаси і автотрофної складової мікропланктону показало неоднорідний характер розподілу досліджуваних параметрів. Різниця сягала порядку за величиною. Висока варіабельність розподілу біохімічних параметрів проявилась у чіткій залежності від гідрологічних і топографічних особливостей досліджуваних зон. Високі концентрації, що відповідають евтрофним критеріям, помічені на півночі та заході полігону, де значний вплив вод протоки Дрейка і моря Белінсгаузена. Низькі показники, які наближаються за значенням до олиготрофних, зафіксовані в південній частині полігону, яка зазнає впливу вод моря Уеддела. Згідно з автотрофним індексом в середині полігону значна частина акваторії містила паритетні біомаси авто- і гетеротрофного мікропланктону, тоді як периферійні ділянки, особливо на північний-захід, містили автотрофну домінують. Розмірно-структурний аналіз показав домінування біомаси крупних фракцій в евфотичній зоні і тенденцію до зростання частки мілкої складової зі збільшенням глибини на периферійних ділянках полігону.

**ATP and chlorophyll  $\alpha$  of microplankton in the Bransfield Strait during the early autumn 2002** by A.A. Sysoev

**Abstract.** The study of ATP and chlorophyll  $\alpha$  as indices of metabolic active biomass and autotrophic component of microplankton has shown dissimilar distribution character of explored parameters. Their differences reached the scope of one order. It was shown that high variability of the biochemical parameters depended clearly on hydrological and topographical features of researched areas. High concentrations corresponding to eutrophic criterions were noted in northern and western parts of polygon, where influences of the Drake Strait and Bellingshausen Sea were significant. Low values, which were similar to oligotrophic means, recorded in the southern part of polygon, which affected by water of the Weddell Sea. According to autotrophic index the parity biomasses of auto- and heterotrophic microplankton were marked in a medial part of a polygon, while the peripheral sites, in particular in north-west, were characterized by the autotrophic majorant. The size structure analysis showed prevalence of biomass of large fractions in the euphotic layer and tendency to the increase of share of small size microplankton with deepening on peripheral areas of polygon.

**Key words:** Bransfield Strait, microplankton, ATP, chlorophyll  $\alpha$ , autotrophic index, size fraction.

### 1. Введение

Район пролива Брансфилд находится под пристальным вниманием исследователей ряда стран. Гидрологические и топографические особенности его имеют определяющее значение в формировании и продуктивности промысловых видов гидробионтов, в первую очередь, криля.

В современной гидробиологической практике важным элементом исследований экосистем является экспресс-оценка распределения живой биомассы микропланктона как главного компонента пищевой цепи для оценки трофности района исследований и разработки паттерны пищевых и энергетических потоков. Аденозинтрифосфат (АТФ) как биохимический

параметр исследования микропланктона, получил широкое распространение в гидробиологической практике благодаря следующим свойствам: АТФ находится только в живых клетках, при нормальных условиях имеет относительно постоянную концентрацию и соотношение с биомассой; количество АТФ может быть проанализировано чувствительными аналитическими методами. Преимущество данного метода перед другими состоит в том, что анализируется лишь метаболически активная составляющая взвеси, при этом полностью отражается картина происходящих процессов в сообществе, затрагивающих смену популяций в сезонных сукцессиях через величины биомассы (Karl, 1980). Такие подходы наиболее важны при изучении энергетических потоков в изучаемой системе, где учитываются, прежде всего, размерные показатели, то есть сообщество анализируется как единое живое вещество, разлагаемое в “спектр биомасс” (Гутельмахер, 1986; Лопухин, Сысоев, 1990). Существуют критерии оценки трофности вод по содержанию АТФ (Karl, 1980). Считают, что воды с концентрацией АТФ, не превышающей 10 нг/л, относятся к олиготрофным, при концентрации от 10 до 100 нг/л – к мезотрофным, более 100 нг/л – к эвтрофным. Оценка метаболически активной биомассы по содержанию АТФ в районе Антарктики проводилась в отдельные годы зарубежными исследователями (Berdalet et al., 1997; Karl et al., 1991), однако в отечественной практике для этих широт исследования выполнены впервые.

Другим широко используемым методом, призванным определить долю автотрофной компоненты микропланктонного сообщества, является анализ содержания хлорофилла  $\alpha$ . Чиладуани и Пагнотта (Chiaduanì, Pagnotta., 1978) предложили использовать гетеротрофно-фотоавтотрофный индекс (НР, англ.) для определения баланса биомасс гетеротрофного и автотрофного микропланктона. Индекс определяется как соотношение концентраций  $100C_{\text{АТФ}}$  и  $C_{\text{хлорофилла}}$ . Принято считать, что при значении индекса  $<10$  доминирует биомасса автотрофов; при паритетном содержании биомасс значение НР составляет от 10 до 20; при значении индекса  $>20$  он является показателем гетеротрофной доминанты. Мы использовали в работе обратный показатель НР – автотрофный индекс (АИ), который определяется отношением  $C_{\text{хлорофилла}}$  к  $C_{\text{АТФ}}$ . Очевидно, преобразуя числовые значения НР, для АИ справедливы следующие критерии содержания биомасс. Значение АИ от 5 до 10 указывает на относительное равенство биомасс гетеро- и автотрофов; при более низких значениях АИ свидетельствует о гетеротрофном доминировании, при повышенных значениях – об автотрофном. Цель нашей работы - проследить особенности распределения биомассы микропланктона и автотрофной ее составляющей по концентрациям АТФ и хлорофилла  $\alpha$ .

## 2. Материалы и методы

Батометрические пробы, непосредственно после отбора, методом вакуумной фильтрации, осаждали на фильтры “Сарториус” (Sartorius, Germany) с размерами пор 0,3 мкм (для тотального анализа, объем 0,3 л), либо на фракционной воронке с последовательным рядом фильтров с размерами пор: 12, 2,5; 1,2; 0,45 и 0,2 мкм (для размерно-фракционного анализа, объем 1 л). Таким образом, согласно международной терминологии (Sheldon et al., 1972), фильтры с диаметром пор 12 мкм содержали микрофракцию, с порами 2,5 мкм – нанофракцию; микрофракцию получали последовательным использованием фильтров с порами 1,2; 0,45 и 0,2 мкм. Непосредственно после фильтрации проводили экстракцию АТФ по методу Холм-Хансена (Holm-Hansen, Booth, 1966). Затем экстракты хранили в морозильной камере при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$  до дальнейших анализов. Измерения концентраций АТФ проводили в трех повторностях хемилюминесцентным методом на приборе АТФ Luminometer 1250 (LKB, Швеция). Для анализа хлорофилла  $\alpha$  батометрические пробы эвфотической зоны объемом от 1,5 до 4 литров с помощью вакуумной фильтрации осаждали на фильтрах «Сарториус» с размерами пор 0,45 мкм. Затем фильтры с пробами высушивали в темноте при комнатной температуре и хранили в морозильной камере для дальнейших анализов. Оптическую плотность элюата измеряли на приборе “Specol – 11” (Карл Цейсс, ГДР). Расчет концентраций проводили по формуле Джеффри и Хамфри (Jeffrey, Humphrey, 1974).

### 3. Основные результаты

На основании полученных результатов, исследуемый район пролива Брансфилд в означенный срок проведения работ можно оценить как мезотрофный, с обширной эвтрофированной зоной в северной и западной частях. Вместе с тем, отмечена высокая вариабельность величин. Диапазон концентраций АТФ на поверхности составил величину порядка.

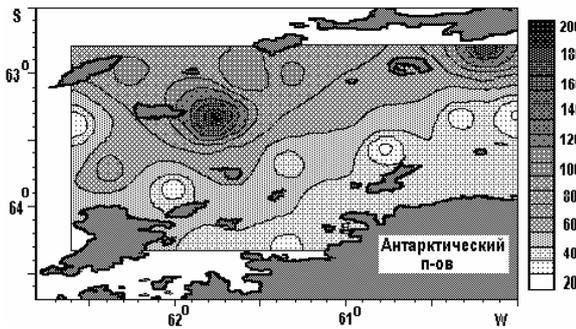


Рисунок 3. Распределение хлорофилла "а" в поверхностном слое вод пролива Брансфилд в марте 2002 г. (мкг/л)

На станции 23 содержание АТФ микропланктона достигало 201 нг/л, в то время как на станции 44 составляло лишь 27 нг/л (табл. 1). На юге полигона воды оценивались как мезотрофные, близкие по значению к олиготрофным, в то время как на севере были отмечены и эвтрофированные участки (рис.1). В поверхностных водах прослеживалось два основных ядра скопления АТФ - на станциях 23 и 50. Ядра пониженных концентраций располагались в широтном направлении на станциях, равноудаленных от континентальной береговой линии (станции 25, 33, 44, 47, 52, рис.1). К югу от указанных минимумов

содержание АТФ несколько увеличилось, хотя осталось довольно низким, близким по значению к олиготрофным.

В слое 0-100 м эта разность величин значительно сглажена, (величины укладываются в четырехкратном диапазоне), хотя общая картина распределения биомассы (повышенная на севере и пониженная на юге) достаточно четко прослеживается (рис. 2).

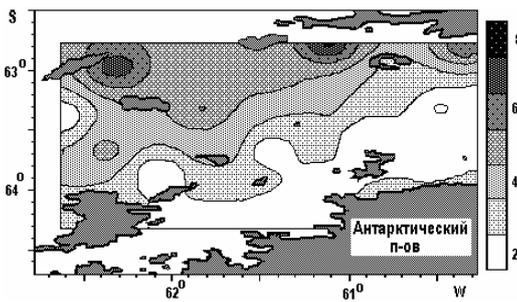


Рис. 2. Распределение АТФ микропланктона в слое 0 - 100 м вод пролива Брансфилд в марте 2002 г. (мг/м<sup>2</sup>)

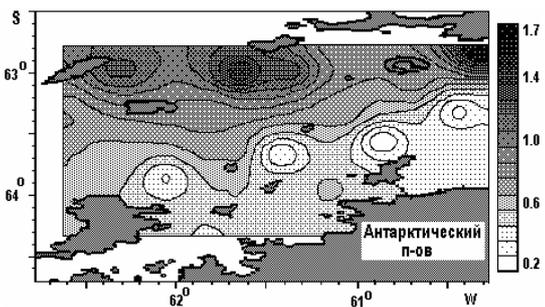


Рис. 3. Распределение хлорофилла в поверхностном слое вод пролива Брансфилд в марте 2002 г. (мг/м<sup>2</sup>)

Распределение хлорофилла «а» на поверхности исследуемых вод в целом имеет такой же характер, как и АТФ (в особенности, с АТФ слоя 0-100м, рис. 2, 3): максимальные значения отмечены на севере полигона, минимум – на юге. Диапазон величин достигает величины порядка. В поверхностном слое на станции 30 концентрация зеленого пигмента достигает 1,5 мкг/л, на станции 44 имеет минимальные значения - 0,22 мкг/л (табл. 1). Следует отметить, что максимум концентрации хлорофилла "а" обнаружен не только на поверхности, но и на горизонте 36м, на станции 21 (1,5 мкг/л, табл. 1). Характерной особенностью является наличие тех же ядер пониженных концентраций в средней части полигона, что и для поверхностного распределения АТФ (рис. 1, 3).

Вертикальное распределение АТФ в значительной мере определялась гидрологическими особенностями. Так, на станции 50 характер распределения типичный для вод без ярко

Таблица 1. Концентрации (С) АТФ и хлорофилла "а" микропланктона вод пролива Брансфилд в марте 2002 г.

№ ст., К <sup>00</sup>	Гориз.	Схлор. $\alpha$ (мг/л)	САТФ (нг/л)	№ ст., К <sup>00</sup>	Гориз.	Схлор. $\alpha$ (мг/л)	САТФ (нг/л)	№ ст., К <sup>00</sup>	Гориз.	Схлор. $\alpha$ (мг/л)	САТФ (нг/л)
14	0	0,69	30,4	28	0	0,80	82,3	40	0	0,82	98,6
63°20'S	6,3	0,79	-	63°36'S	6,5	0,97	80,4	62°48'S	5,4	0,91	93,5
62°39'W	14,5	0,67	24,4	61°40'W	14	0,80	72,4	61°00'W	12,5	0,86	78,6
	24	0,67	25,8		24	0,84	93,2		20,7	0,85	49,6
	42	0,57	30,8		42	0,45	46,8		36	0,82	64,7
	100	-	9		100	-	14,9		80	-	123,8
17	0	0,25	-	30	0	1,50	90,3		100	-	20,2
64°15'S	14	0,46	-	63°00'S	40	-	82,6	42	0	0,85	78,9
62°45'W	40	0,43	-	61°40'W	70	-	26,1	63°03'S	25	-	74,7
	100	0,17	-		100	-	18,8	60°36'W	50	-	11,3
19	0	0,68	83,4	31	0	1,26	115,4		100	-	11,1
63°40'S	30	-	63,8	63°00'S	25	-	95,3	44	0	0,22	27,4
62°20'W	60	-	52,4	61°19'W	60	-	20,8	63°34'S	30	-	24,4
	100	-	11,7		100	-	24,8	60°46'W	60	-	11,8
21	0	1,24	113,3	33	0	0,30	41,4		100	-	21
63°00'S	5,5	1,38	85,9	63°40'S	19	0,43	25,4	45	0	0,43	42,8
62°16'W	12,5	1,49	167	61°21'W	55	0,47	19,6	63°45'S	25	-	33,6
	21	1,47	75,4		80	0,28	18,6	60°23'W	50	-	26,6
	36	1,50	73,6		100	0,29	21,9		100	-	22,5
	70	-	57,6	35	0	0,56	37	47	0	0,27	34,9
	100	-	50,2	64°18'S	15	-	29,4	63°20'S	25	-	26,9
23	0	0,86	201,1	61°21'W	25	-	39,8	60°19'W	50	-	15
63°20'S	25	-	75,2		40	-	15,2		100	-	8,1
61°68'W	60	-	25,9		100	-	14,2	50	0	1,73	166,8
	100	-	15,8	36	0	0,61	42,4	62°48'S	12	-	145,4
25	0	0,32	33,7	63°57'S	9	0,89		60°11'W	36	-	56,4
63°52'S	6,5	0,44	34	61°02'W	22	0,82	34,4		100	-	17,4
62°00'W	14	0,37	37,3		35	0,63	42	52	0	0,28	28,9
	24	0,25	21,8		60	0,29	14,2	63°19'S	9	0,24	
	42	0,25	21,2		100	-	11,2	60°00'W	22	0,19	25
	100	-	10,5	38	0	0,77	73,6		35	0,18	13,9
26	0	0,50	41,2	63°20'S	6	0,76	65,1		60	0,15	14,9
64°20'S	30	-	21,7	61°00'W	13	0,66	42,2		100	-	9,3
61°47'W	60	-	15,9		22	0,59	43,5				
	100	-	12		39	0,42	35,7				
					50	-	45,5				
					100	-	25,3				

выраженных температурно-плотностных градиентов: максимум на поверхности и равномерная регрессия с глубиной. На станции 40, отстоящей от 50-й на небольшое расстояние, но имеющей четко выраженный пикноклин на 80 м, наблюдаем некоторое снижение содержания АТФ с глубиной до 20 м, а затем рост концентраций с максимумом в районе скачка плотности на горизонте 80 м.

Характер вертикального распределения АТФ в эвфотическом слое в значительной мере определялся распределением автотрофной компоненты микропланктона, о чем свидетельствуют схожие вертикальные профили АТФ и хлорофилла "а" (рис. 4). Однако распределение зеленого пигмента носит несколько иной характер: максимальные значения в большинстве случаев не в поверхностном слое, а на больших глубинах. Причем, как правило, это зависит от тропности вод и, соответственно, прозрачности, но встречаются максимальные значения и в самых нижних горизонтах эвфотического слоя при высоких индексах тропности (например, на станции 21, рис. 4).

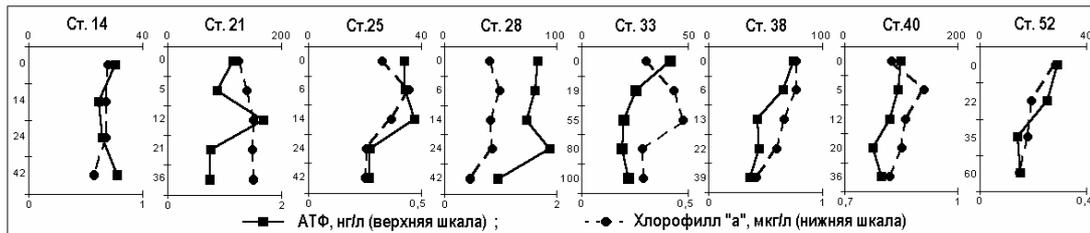


Рис. 4. Вертикальные профили распределения АТФ и хлорофилла "а" микропланктона вод пролива Брансфилд в марте 2002 г.

Автотрофный индекс указывает на баланс автотрофной и гетеротрофной компонент биомассы микропланктона в обширной центральной части полигона в поверхностных водах (рис. 5). Лишь в районе станции 23 отмечено слабое доминирование гетеротрофов (при значении АИ - 4). На периферии, в особенности в северо-западной части полигона индекс имел значения, соответствующие явному доминированию автотрофной компоненты микропланктона. Например, на станции 14 он достигал значения свыше 20.

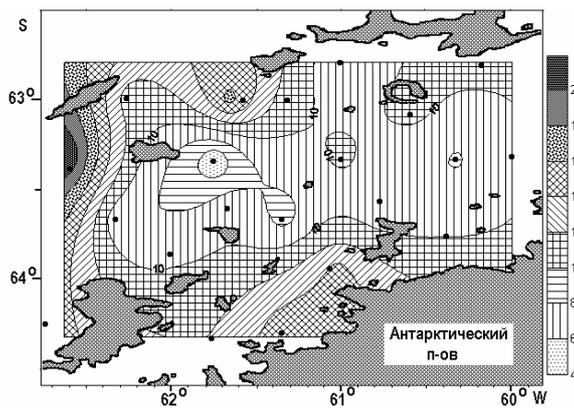


Рис. 5. Распределение автотрофного индекса микропланктона вод пролива Брансфилд в марте 2002 г.

Фракционный анализ, проведенный на пробах поверхностных вод и горизонтах с 10% проникновения солнечной радиации, показал, в целом, доминирование микрофракции и высокое процентное содержание пикофракции. При заглублении характерно возрастание доли нано- и пикофракции на периферийных станциях западной и северной частей полигона.

### Обсуждение

Анализ полученных данных показал тесную связь между развитием микропланктонного сообщества в исследуемый сезон и гидрологическим режимом района. Исследуемые биохимические параметры имеют наибольшие величины в северо-западной части полигона, где, согласно данным гидрологического отряда, имеет место влияние вод пролива Дрейка и

моря Беллинсгаузена. Эти более теплые воды, с более высоким, чем у прибрежных антарктических вод содержанием биогенов, создают условия для высокой продукции фитопланктона и, в конечном счете, всему микропланктонному сообществу. В противоположность этой зоне, в южной части полигона, несмотря на поднятие глубинных вод, развитие микропланктона подавлено влиянием холодных низкопродуктивных вод моря Уэдделла. В потенциально высокопродуктивных зонах, имеющих в силу топографических особенностей пространственную ограниченность, очевидно, микропланктонное сообщество подвержено существенному влиянию пресса консументов. Например, в устье пролива Джерлач (ст. 26), по данным (Karl D.M. et al., 1991), а также по гидрологическим показателям, одна из самых высокопродуктивных зон района. Однако по нашим данным, этот участок не выделяется высокими величинами биохимических параметров. Между тем, здесь зафиксированы самые крупные скопления криля. Из этого следует, что малые концентрации микропланктона – результат потребления его консументами, в первую очередь крилем. Значительное снижение концентраций микропланктона за счет потребления, вероятно, имеет место и на других обширных участках, но оно не столь очевидно.

Согласно размерно-структурному анализу, проведенному с помощью фракционирования микропланктона (рис. 6), на центральных станциях с заглубленным пиком биомассы (ст. 28 и 38) высокий процент общей биомассы принадлежит микро- и пикофракции в поверхностных водах, с возрастанием доли микрофракции при заглублении. На периферийных станциях с пиком биомассы на поверхности (ст. 21, 25, 40 и 52), прослеживалась тенденция возрастания доли мелких фракций с глубиной. Можно предположить, что первый описанный тип распределения биомассы типичен для вод верхнего квазиоднородного слоя, подпираемого заглубленным пикноклином. Безусловно, крупный микропланктон, как пищевой объект для криля, имеет большее значение в промышленной оценке района, но, согласно работе (Sheldon et al., 1972), биомассы всех размерных фракций находятся в динамическом равновесии. Исходя из этого, автор данной статьи делает предположение, что паритетные величины различных размерных фракций отражают высокую степень устойчивости системы в целом, наиболее характерную для тропических экосистем.

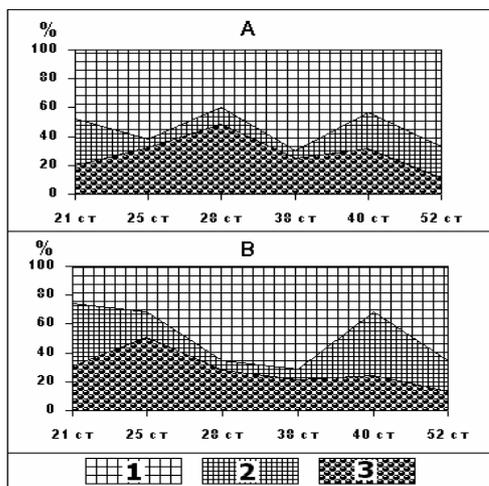


Рис. 6. Соотношение микро- (1), нано- (2) и пикофракции (3) микропланктона в поверхностном (А) и в нижнем фотическом (В) слоях вод пролива Брансфилд в марте 2002 г.

мест и сезона диапазон величин. Исследования параметров в этом районе в сравнительном аспекте в различные сезоны, проведенные ранее Karl et al. (1991), показали, что в ранний осенний сезон, на который приходились наши съемки, наблюдался спад продуктивности и снижение биомассы микропланктона по сравнению с предыдущими сезонами. Однако некоторые отличия отражают особенности сезонного развития микропланктонного сообщества в 2002 г. Необходимо отметить, что нашей сезонной съемке предшествовали аномально холодная зима и прохладное лето, что не могло не повлиять на общее развитие микропланктонного сообщества. В частности, автотрофный индекс, рассчитанный для поверхностных вод по полученным нами данным, значительно превышал таковой в предыдущих исследованиях. Можно предположить, что низкие температуры и обильный ледяной покров в пик вегетационного сезона не позволили фитопланктону развиваться в должной мере. Это привело к сохранению биогенных ресурсов и отодвинуло пик развития

автотрофного микропланктона с середины лета (пика солнечной радиации) на конец лета - начало осени. Из этого следует, что развитие микропланктона в обычном объеме могло либо произойти в очень сжатые сроки, чему препятствовали низкие для интенсивного метаболизма температуры, либо, скорее всего, валовая годовая продукция была значительно снижена, по сравнению с предыдущими годами.

### Выводы

1. По содержанию АТФ микропланктона, воды исследуемого района следует оценить как мезотрофные с элементами эвтрофирования в северной и западной частях полигона.
2. Характер распределения живой биомассы микропланктона определялся, главным образом, гидрологическим режимом вод.
3. Распределение хлорофилла «а» на полигоне имело такой же характер, как и распределение АТФ: высокие индексы отмечены в северной части, низкие – в южной.
4. Вертикальное распределение АТФ в эвфотическом слое определялось, главным образом, распределением фитопланктона.
5. Максимальные значения концентраций зеленого пигмента были заглублены, степень их заглубления обусловлена, по-видимому, трофностью района и, как следствие, прозрачностью вод.
6. В обширной центральной части полигона отмечен паритет биомасс авто- и гетеротрофного микропланктона, на периферии доминировали автотрофы.
7. В эвфотической зоне по биомассе доминировали крупные формы микробного сообщества, прослежена тенденция к росту доли мелких организмов с глубиной на периферийных участках полигона.

### Благодарности

Автор глубоко признателен начальнику отряда Гидрологии Артамонову Ю.В. за предоставленные материалы по гидрологии исследуемого района, полученные в 7-й Украинской Антарктической Экспедиции.

### Литература

- Гутельмахер Б.Л.** Метаболизм планктона как единого целого: трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона. – Л.: Изд-во Наука. - 1986. - С. 3-4.
- Лопухин А.С., Сысоев А.А.** и др. Микропланктон тропических районов Тихого океана: распределение и сравнительная характеристика размерных фракций по результатам определения АТФ и хлорофилла “а” // *Океанология*. - 1990. - 30, №6. - С. 987-998.
- Berdalet E., Vaque D., Arin L. et al.** Hydrography and biochemical indicators of microplankton biomass in the Bransfield Strait (Antarctica) during January 1994 // *POLAR-BIOL.* – 1997. - 17, N. 1. - P. 31- 38.
- Chiaduanì G., Pagnotta R.** Ratio ATP/chlorophyll as index of river's water quality // *Verh. Internat. Verein. Limnol.* – 1978. - N. 20. - P. 1897 - 1901.
- Holm-Hansen O., Booth C.R.** The measurement of adenosine triphosphate in the Ocean and its ecological significance // *Limnol. Oceanogr.* - 1966. - 11, N.4. - P. 510-519.
- Karl D.M.** Cellular nucleotide measurements and applications in microbial ecology // *Microbiol. Rev.* - 1980. - N.44. - P. 739-796.
- Karl D.M., Holm-Hansen O., Taylor G.T. et al.** Microbial biomass and productivity in the western Bransfield Strait, Antarctica during the 1986-87 austral summer // *Deep Sea Res.* – 1991. - 38, N.8/9. - P. 1029 - 1055.
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F.** New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c and  $c_2$  in algae, phytoplankton and higher plants // *Annual Report 1973-1974.* - P. 6-8.
- Sheldon R.W., Prakash A., Sutcliffe W.H.** The size distribution of particles in the Ocean // *Science.* – 1972. - 17, N.3. - P. 327 - 340.