

КМ 58  
0-43



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им.Л.В.КИРЕНСКОГО  
СО АН СССР

Препринт ИФСО - 12Б

И.Н.Трубачев, В.А.Барашков, Г.С.Калачева,  
К.И.Баянова

ОДНОКЛЕТОЧНЫЕ ВОДОРОСЛИ - ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ  
ИСТОЧНИК ПИЩЕВОГО СВРЬЯ

Красноярск, 1977

кз 58  
0-43

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л. В. КИРЕНСКОГО  
СО АН СССР

Препринт ИФФС - 125

И. Н. Трубачев, В. А. Барашков, Г. С. Калачева,  
Ю. И. Баянова

ОДНОКЛЕТОЧНЫЕ ВОДОРОСЛИ - ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ  
ИСТОЧНИК ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

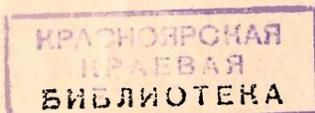
Красноярск

1977

#### Аннотация

Из потенциальных продуцентов пищевых веществ: белков, аминокислот, липидов, углеводов и витаминов рассматриваются одноклеточные зеленые (хлорелла, платимонас), синезеленые (спирулина, цианидиум, кокколедия, синехококкус) и красные (порфиридиум) водоросли. Биологическая ценность белков этих водорослей определялась по аминокислотному и фракционному составу, их атакуемости протеолитическими ферментами *in vitro* и продуктам протеолиза.

Б-4440



Ответственный за выпуск к.б.н. И.Н.Трубачев

Одноклеточные водоросли - потенциальный источник  
пищевого сырья

Изучение низших организмов, в частности одноклеточных водорослей, как потенциально возможного источника кормовых и пищевых веществ, связано с определением их химического состава. Эти водоросли представляют интерес и как регенерационное звено биологической системы жизнеобеспечения человека. Знание химии водорослей необходимо также для правильной оценки их роли в природе и для инвентаризации веществ этих водорослей.

Предлагаемая работа посвящена сравнительной оценке биохимического состава некоторых зеленых, синезеленых и красных водорослей, выращенных в периодическом и непрерывном режимах культивирования. Исследование биохимического и минерального состава организмов является одним из первичных показателей возможного использования биомассы или отдельных её компонентов в пищевых и кормовых целях.

В качестве объекта исследования использованы из зеленых водорослей *Chlorella vulgaris* (термофильный штамм), характеристики которой даны в работах (1,2) и *Platimonas viridis*, из красных - *Porphyridium cruentum*, из синезеленых - *Spirulina platensis*, *Cyanidium caldarium*, *Coccolopia*, *Synechococcus elongatus*. Последние два вида водорослей выделены из гидротерм острова Кунашир (3). Материалом для изучения биохимического состава были водоросли, выращенные нестерильно в лабораторных условиях методом периодического культивирования. Хлорелла, кроме того, выращивалась на установке для непрерывного культивирования (4). Для синекоккуса и коккопедии использовалась среда F 6 по прописи Громова (5), для

спирулинн- среда Заррука, для хлореллы- среда Тамия, где нитрат был замещён на мочеви́ну. Источником азота для всех видов синезелёных водорослей были нитраты. Температура культивирования для синехококкуса и коккопедии поддерживалась на уровне 56 и 46° соответственно, с колебаниями ±3°С. Предварительными опытами было найдено, что интервалом оптимальных температур для синехококкуса является 53-59°. Для коккопедии указанная оптимальная температура была выбрана на основе изучения тех гидроэкологических условий, в которых была обнаружена эта микроводоросль в природе. Для спирулинн температура культивирования поддерживалась в интервале 32-35°С, для хлореллы-35-38°С. Все микроводоросли, кроме спирулинн, при выращивании постоянно продувались смесью воздуха с 5% CO<sub>2</sub> по объёму. Было также найдено ранее, что такая концентрация CO<sub>2</sub> в барботажном воздухе в применяемых нами условиях культивирования не лимитировала рост водорослей. Суспензия спирулинн продувалась воздухом с периодической подачей в нём CO<sub>2</sub>. Освещённость на поверхности культуры была в пределах 16-18 клк. Использовались лампы дневного света типа ЛДС-125. Морские водоросли *Porphyridium* и *Platymonas* выращивались при температуре 24-26° на черноморской воде с добавлением недостающих минеральных элементов- азота и фосфора(6). Культивирование водорослей начиналось с малой плотности клеток при слое суспензии, поглощающем 20-30% действующего потока ФАР. При достижении плотности 1-2 г абс.сух.вещества/ литр суспензии (водоросли в этих условиях полностью поглощали падающий на культуру световой поток) клетки отделяли центрифугированием при 8 тыс. об./мин.(спирулину-фильтрованием через капроновую ткань), лиофилизировали или сушили при 105°С(для общих ана-

лизав) и затем использовали для анализов. Витамины определяли в свежесобранном материале. Содержание сырого протеина рассчитывали умножением общего азота на коэффициент 6,25, углеводы определяли антроновым методом(7), фракции углеводов по методике Белозёрского и Проскурякова(8), углеводы типа крахмала- с хлорной кислотой(9), липидный состав- по ранее описанному методу (10), нуклеиновые кислоты- спектрофотометрически(11), каротин- после омыления спиртовым раствором щёлочи(12), аскорбиновую кислоту- с 2,6- дихлорфенолиндофенолом, тиамин и суммарный рибофлавин на флуорометре (13), аминокислоты- на автоматическом анализаторе KLA-3B(Хитачи), цистин и метионин- после окисления биомассы надмуравьиной кислотой (14), триптофан- по Хорну и с сульфонитратной смесью(12).

В таблицах 1-8 представлены данные по биохимическому составу изученных одноклеточных водорослей. Основным биохимическим компонентом в клетках этих водорослей являются белки. Их количество составляет 50-60% от сухого веса биомассы (табл.1), кроме порфиридиума и платимонаса(35-45%). Различия в содержании азотистых веществ(белки, нуклеиновые кислоты) между большинством исследованными водорослями незначительны. Наиболее высоким содержанием сырого протеина отличается нехококкус, а наименьшим- порфиридиум. По данным некоторых авторов(15-16) спирулина содержит 50-65% белка. В непрерывной культуре хлореллы азотистых веществ меньше, чем в периодической. Небелковый азот составляет незначительную величину(1-1,5% от веса сухой биомассы). Проведенные исследования (16) показали возможность управления составом биомассы спирулины путём снижения в питательной среде элементов(азот, сера) или их исключения (магний). Изменения биохимического состава

биомассы в этом случае аналогичны тем, которые наблюдались для хлореллы(17-19), т.е. снижается содержание белков за счёт усиленного накопления углеводов или липидов.

Следует отметить, что термофильность у синезелёных водорослей проявляется в устойчивости плазматических белков к денатурации, что связано с их физико-химическим строением. В литературе отмечается, что среди азотсодержащих веществ синезелёных водорослей особый интерес представляют пигментные белки или билипротеины, участвующие в фотосинтетических процессах. Эти белки растворимы в воде и окрашены в фиолетово-красный цвет для фикоэритрина и сине-фиолетовой цвет для фикоцианинов(20). Фикоэритрин был выделен в чистом виде из красных водорослей, изучены его спектральные и фотохимические свойства(21), а также аминокислотный состав(22).

При исследовании аминокислотного состава гидролизатов клеток зелёных, синезелёных и красных водорослей существенных различий не найдено (табл.2). Общим для всех этих водорослей является высокое содержание лизина, аргинина, аспарагиновой и глутаминовой кислоты, аланина и лейцина. Низкие значения отмечены по гистидину, цистину, метионину, триптофану. Из всех этих водорослей коккопедия и цианидиум наиболее богаты цистином, а синехококкус и цианидиум-метионином. По процентному содержанию незаменимых аминокислот от их общей суммы все исследуемые водоросли близки между собой. Для биологической оценки белков этих водорослей в табл.3 приведены данные по их аминокислотному составу в сравнении с полноценными белками животного(казеин) и растительного(люцерн) происхождения. Из этой таблицы следует, что белки изучаемых водорослей по аминокислотному составу близки к казеину

и белкам люцерны. Люцерна, использованная для анализа, была выращена в фитотроне Института физики СО АН СССР. В белках люцерны по сравнению с водорослями меньше метионина (кроме спирулины), аргинина, но больше изолейцина (кроме синехококкуса и спирулины), лейцина и фенилаланина. В сравнении с казеином в водорослях меньше лизина, метионина, (кроме порфиридиума), изолейцина (кроме спирулины и синехококкуса), но больше цистина, треонина, аргинина и близкие значения по лейцину фенилаланину, триптофану.

Важным показателем биологической ценности белка является сравнение аминокислотного состава исследуемого продукта (объекта) с идеальными шкалами аминокислот, соответствующими полностью сбалансированному по аминокислотному составу гипотетическому белку. На этом сравнении основан метод аминокислотного счёта.

Результаты вычисления аминокислотного счёта (23) показали, что исследуемые белки содержат больше, чем указано в шкале ФАО (1973г) лейцина, тирозина, фенилаланина, треонина, валина. В таблице 4 для сравнения приведены данные по аминокислотам для хемоавтотрофов-водородных бактерий (*Hydrogenomonas*) и железобактерий (*Thiobacillus ferrooxidans*). Лимитирующими биологическую ценность белка для большинства этих микроорганизмов являются серосодержащие аминокислоты, изолейцин для хлореллы и платимонасы, лизин - для спирулины, синехококкуса и коккопедии (табл.4). При пищевой оценке белка необходимо учитывать также тот факт, что избыточно высокое содержание одной аминокислоты снижает усвояемость структурно-родственной аминокислоты. Например, избыток лейцина понижает усвоение изолейцина (24). Доказано, что качество белка

Таблица 4

Аминокислоты в скр. белке в одноклеточных организмах

АМИНОКИСЛОТЫ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	периодич. непрерывн. культура								
Изолейцин	86	89	128	117	112	103	82	95	97
Лейцин	124	128	133	133	123	137	113	112	121
Лизин	128	109	91	96	127	121	109	104	101
Метионин+цистин	90	101	64	78	91	107	93	106	124
Фенилаланин+тирозин	135	126	137	141	134	138	142	169	153
Треонин	118	122	133	146	132	144	124	136	123
Триптофан	136	159	119	113	140	100	130	95	116
Валин	112	109	120	110	128	125	100	106	107

- 1 - Chlorella
- 2 - Spirulina
- 3 - Coocopedia
- 4 - Synochococcus
- 5 - Hydrogonomonas
- 6 - Rhodospirillum rubrum
- 7 - Platimonas
- 8 - Cyanidium
- 9 - Porphyridium

в большой степени зависит от отношения левцина к изолейцину, причём оптимальным является соотношение 1,8(25). По этому показателю наилучшими будут белки спирулины(1,8) и водородных бактерий(1,9), а худшими-хлореллы(2,5).

Для оценки качества белков по сбалансированности незаменимых аминокислот нами использован также EAA-INDEX -индекс биологической ценности белка(табл.5), по которому сравнивалось содержание эссенциальных аминокислот в исследуемых белках с идеальным-суммарным белком куриного яйца(26). По этому показателю лучшими являются суммарные белки железобактерий, водородных бактерий, хлореллы(периодическая культура), а худшими-спирулины, платимонаса и синехококкуса.

Естественно, что для определения истинной ценности белков этих водорослей необходимо учитывать также и степень атакуемости их пищеварительными ферментами, т.к. происхождение белков влияет на их способность к перевариванию(27). Средняя перевариваемость биомассы спирулины составляет 70%(28), а белки хлореллы и сценодесмуса усваиваются организмом животных на 60-80% (29). Перевариваемость белка хлореллы пищеварительными ферментами *in vivo* и *in vitro* зависит от способов обработки её биомассы и составляет величину до 80-90%(30).

Другим важным компонентом клеток водорослей являются углеводы. Наибольшее количество углеводов обнаружено в коккопедии, порфиридиуме и хлорелле в условиях непрерывного культивирования, основная часть которых представлена гемицеллюлозой, кроме красной водоросли, где больше углеводов типа крахмала и водорастворимых сахаров. Другая морская водоросль-платимонас также характеризуется высоким содержанием легкоподвижных, хорошо усвояемых углеводов типа крахмала. По литературным данным и нашим (31) клеточная оболочка спирулины содержит мало целлю-

Таблица 5

Индекс биологической ценности белков одноклеточных организмов

Объект исследования	Белок, % по сумме аминокислот	% аминокислот в белке										EAA Index %	
		Лейцин	Изолейцин	Фенилаланин	Тирозин	Треонин	Листидин	Валин	Аргинин	Лизин	Метионин		Триптофан
<i>Spirulina</i>	52,86	9,34	5,12	4,18	4,02	5,31	1,55	5,97	6,98	4,99	1,51	1,19	76,90
<i>Synechococcus</i>	59,36	9,31	4,68	4,49	3,94	5,82	1,41	5,49	6,83	5,27	1,95	1,12	77,61
<i>Coccoloba</i>	44,86	7,91	3,87	4,16	5,75	5,21	1,91	6,55	7,66	5,34	1,71	1,15	80,04
<i>Chlorella</i> (перодическая культура)	47,22	8,68	3,45	4,70	3,36	4,72	2,31	5,61	6,64	7,05	2,13	1,35	80,15
<i>Chlorella</i> (непрерывная культура)	43,00	8,91	3,55	4,41	3,13	4,88	1,81	5,41	7,74	5,98	2,16	1,58	78,94
<i>Hydrogenomonas eutropha</i>	62,14	8,60	4,47	4,42	3,62	5,29	1,96	6,38	7,30	7,00	2,63	1,40	82,0
Куриное яйцо	9,2	8,0	8,0	6,3	4,5	4,9	2,1	7,3	6,4	7,2	4,1	1,50	100
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	55,03	9,60	4,11	4,64	3,65	5,78	3,03	6,26	7,05	6,64	3,14	1,00	87,84
<i>Platimonas</i>	33,12	7,91	3,29	4,95	3,56	4,95	1,84	5,01	7,30	5,98	2,05	1,30	76,74
<i>Cyanidium</i>	49,32	7,87	3,81	4,26	5,90	5,45	1,54	5,31	7,79	5,72	2,23	0,95	78,65
<i>Porphyridium</i>	38,77	8,49	3,89	4,98	4,23	4,93	1,65	5,36	6,96	5,57	2,63	1,16	79,54

лоан(0,2-0,7%), что должно повншать её пищевую ценность. По содержанию общей фракции липидов и составляющих её компонентов(омыляемне, неомыляемне и гидрофильные) отмечены различия между видами водорослей(табл. 6).Синезелёные и красные водоросли, по сравнению с хлореллой и платимонасом, содержат меньше липидов. Следует указать на наиболее высокий процент(от общей фракции липидов) омыляемых веществ в хлорелле, выращенной при периодическом культивировании, коккопедии, синехококкуса, цианидиуме, платимонасе. Хлорелла непрерывного культивирования и спирулина, наоборот, имеют низкое содержание омыляемых компонентов и наибольшее количество веществ гидрофильной природы. Наименьшее количество веществ гидрофильной природы содержится в платимонасе. Липнокислотный состав водорослей представлен в таблице 7, из которой видно, что основными кислотами этих водорослей являются пальмитиновая, олеиновая, линолевая(в синехококкусе линолевая кислота не обнаружена). В хлорелле кроме того в значительных количествах имеется гексадекадиеновая, гексадекатриеновая и линоленовая кислоты, отсутствующие в синезелёных водорослях. В спирулине найдена  $\gamma$ -линоленовая кислота, которой нет в других водорослях.(32) Морские водоросли содержат более богатый набор жирных кислот, чем другие водоросли.

Оценим качество липидов водорослей. Липиды исследованных водорослей(кроме платимонаса и порфиридиума) содержат одну эссенциальную кислоту(линолевую, линоленовая кислота по последним данным не является незаменимой), количество которой достигает 7-35% от общей суммы жирных кислот(0,20-1,52% на абс. сух. в-во). Липиды хлореллы, в отличие от других водорослей, характеризуются высокой степенью ненасыщенности, гла-

Таблица 6

Состав липидов водорослей

Виды водорослей	Общая фракция липидов (% от сухого вещества) (M ± m)	% от общей фракции липидов (M ± m)		% от сухого вещества			
		омыляе- мые	неомыляе- мые				
		гидрофиль- ные	гидрофиль- ные	омыляе- мые	неомыляе- мые	гидрофиль- ные	
<i>Chlorella</i> (непрерывная культура)	20,2±2,8	22,8±3,5	13,1±1,8	64,1±4,1	4,6	2,7	12,9
<i>Chlorella</i> (периодическая культура)	15,6±1,1	44,5±2,4	15,9±1,6	39,6±2,0	6,9	2,5	6,2
<i>Spirulina</i>	10,0±1,6	28,4±2,1	8,2±1,6	63,4±1,7	2,8	0,8	6,4
<i>Cocconeidia</i>	8,3±0,9	49,6±6,0	13,7±3,3	36,7±6,8	4,1	1,2	3,0
<i>Synechococcus</i>	10,5±1,5	43,3±0,8	9,5±2,6	47,2±2,2	4,5	1,2	4,8
<i>Cyanidium</i>	10,3±1,3	43,3±5,1	23,6±3,7	33,1±4,4	4,5	2,4	3,4
<i>Platimones</i>	18,2±1,5	41,6±1,8	30,0±5,4	28,4±3,6	7,6	5,5	5,2
<i>Porphyridium</i>	7,7±1,3	24,3±1,5	14,8±1,9	60,9±1,7	1,9	1,1	4,7

вным образом, за счёт полиеновых кислот (гексадекадиеновая, гексадекатриеновая, линолевая, линоленовая), содержание которых составляет около 3% на абс. сух. в-во (табл. 7). Другие виды синезелёных водорослей имеют более высокое содержание ненасыщенных жирных кислот (33). Неомыляемая фракция липидов, в состав которой входят каротиноиды, стеринны, углеводороды, высокомолекулярные спирты и др., (общая сумма 1-3% на абс. сух. вес) служит источником биологически активных веществ. Наличие сравнительно большого количества гидрофильных компонентов (идентификация которых до сих пор не сделана) снижает качество жира.

Синезелёные водоросли по сравнению с хлореллой содержат меньше (примерно в 2 раза) фосфолипидов, которые представлены одним компонентом — фосфатидилглицерином. В хлорелле содержится 2,3% фосфолипидов и спектр их следующий: фосфатидилглицерин, фосфатидилинозит, фосфатидилэтаноламин и холин.

В настоящее время не имеется достоверных методов для определения биологической ценности жиров на основе их химического анализа. Поэтому изучение влияния пищевых жиров на жирнокислотный состав клеточных мембран — один из важнейших подходов к проблеме определения биологической ценности жира. Первое место среди полиеновых жирных кислот мембран принадлежит арахидоновой кислоте. Жиры обеспечивающие поддержание "нормальной" жирнокислотной формулы мембран, считаются полноценными (34).

Из таблицы 1 видно, что водоросли являются хорошим источником не только белка, но и витаминов группы В (тиамин, рибофлавин), каротина и аскорбиновой кислоты. Было показано, что с увеличением освещённости и повышением интенсивности биосинтеза, содержание аскорбиновой кислоты в спирулине увели-

чивается с 12,4 до 220мг%(35). Это открывает возможность направленного синтеза биологически активных веществ.

Из приведенных в таблице 9 сравнительных данных видно, что в биомассе одноклеточных авто- и хемоавтотрофов содержится (в пересчёте на абс. сух. вещество) значительно больше тиамина, рибофлавина и каротина чем в высших растениях, которые являются главным поставщиком витаминов для человека. По содержанию аскорбиновой кислоты, наоборот, редис, репа, укроп, капуста, лук-батун и огурцы превосходят водорослей. Однако, при оценке содержания на сырой вес этого преимущества нет, что объясняется большей оводнённостью овощей. В хлрелле кроме того найдены в большом количестве витамин В<sub>6</sub>, В<sub>12</sub>, биотин, никотиновая, пантотеновая и фолиевая кислоты (35,36).

По общему содержанию золы все исследуемые водоросли, кроме спирулины, платимонасы и порфиридиума, сходны (7-8%). Высокая зольность (10-20%) последних снижает их пищевые качества.

Вышеприведённые данные по биохимическому составу водорослей не дают пока возможности отдать предпочтение какой-либо из них по пищевой ценности. Имеющиеся в литературе данные говорят в пользу спирулины. Эта водоросль с давних пор и по настоящее время в некоторых районах земного шара (республика Чад, Эфиопия, Кения) используется в пищу в виде тонких лепёшек, которые местные жители получают высушиванием спирулины на горячем песке. Эти лепёшки с запахом сушёной рыбы или мясных концентратов хорошо сохраняются и используются в пищу в сыром виде или после варки. Химический состав их был следующий: белки-45-49%, общие углеводы- 16-20%, жир- 5-6%, целлюлоза- 0,2-0,7%, зола- 14-18% (37). К другим важнейшим преимуществам этой культуры относится лёгкость разрушения клеточной оболочки и следовательно относительная простота вы-

деления белка из клеток. Однако, по сравнению с хлореллой, спирулина оказалась более чувствительной к меди и цинку(38), что накладывает ограничения на технологию её культивирования в массовом масштабе. Установлено, что из 15 видов резин, используемых в установках для культивирования только 4 оказались пригодными для выращивания спирулины, остальные токсичны для неё(39).

Необходимо учитывать, что использование результатов химических анализов для оценки пищевой и кормовой ценности водорослей без учёта других факторов может привести к большой ошибке. Так некоторые синезелёные водоросли являются продуцентами токсических веществ. Например, *Microcystis aeruginosa* NRCC-1 имел токсин, который не обнаруживался в свежих нормально развивающихся водорослях, но интенсивно синтезировался в ответ на резкие изменения внешней среды. Этот токсин оказался циклическим полипептидом с молекулярным весом 1300-2600. Считают, что токсическим началом данного соединения является наличие в его молекуле D - серина, вместо обычной L - формы(40).

В заключение следует указать, что хлорелла, сценедесмус и спирулина в настоящее время широко используется в Узбекистане для кормления сельскохозяйственных животных (41) и гусениц тутового шелкопряда (42, 43). Важная роль принадлежит этим водорослям в очистке сточных вод (44, 45). Некоторые виды синезелёных водорослей принимают участие в повышении плодородия почв и в геохимических процессах. Начаты также работы по комплексной переработке биомассы хлореллы и использованию отдельных её компонентов в медицине и парфюмерии. Полученные при этом из биомассы водорослей белки могут быть использованы в пищевой промышленности (46). Проведенный химический анализ не даёт основания для предпочтения какой-либо исследуемой во-

доросли, т. к. все виды довольно сходны. Поэтому необходим следующий этап работы - сравнительное определение биологической ценности водорослей в опытах на животных и оценка технологии их массового культивирования.

Сравнение одноклеточных организмов по устойчивости к дезинтеграции и экстракции из них белков.

Важным показателем при пищевой и кормовой оценке одноклеточных является прочность клеточной оболочки, поэтому нами исследовалось в сравнительном плане устойчивость одноклеточных водорослей к дезинтеграции, экстракция и характеристика выделенных из них белков.

При выделении белков необходимо:

1. Разработка метода дезинтеграции клеток.
2. Выбор оптимального экстрагента, температуры и время экстракции.
3. Отделение остатков клеточных структур от белкового экстракта.
4. Очистка белкового экстракта от нежелательных веществ, перешедших в раствор, например, нуклеиновых кислот.
5. Сушка белкового раствора.

Способы разрушения больших количеств биомассы микроорганизмов пока недостаточно разработаны. Разрушение, основанное на принципе "декомпрессии" может использоваться в промышленном масштабе(47). В лабораториях для этих целей успешно используется дезинтеграция со стеклянными микробусами(48). Дезинтеграция, проводимая в среде органического растворителя, не только ускоряет процесс разрушения клеток, но и удаляет вещества типичной природы и балластные вещества(полимер аз - оксимасляной

кислоты). При этом белковые препараты лучше сохраняются (49). Для экстракции белков используют воду, растворы солей, спирта и щёлочи. Наибольший выход белка получают при использовании универсального растворителя белков - щёлочи, так как она экстрагирует не только свободные, но и связанные, структурные белки. Однако при этом в экстракт переходят и нуклеиновые кислоты, которых в одноклеточных организмах обычно много, что является существенным препятствием употребления биомассы в пищу. Поэтому необходимо дальнейшее разделение этих веществ. Белки обычно осаждают в изоэлектрической точке при подкислении раствора. При повышении температуры белки осаждаются быстрее и полнее. Перед осаждением белков необходимо центрифугированием или сепарированием удалить остатки клеточных структур. При экстракции белка для пищевых целей необходим <sup>подбор</sup> рН, температуры и времени контакта с экстрагентом, не понижающих качество белка.

Исследовали зависимость разрушения клеток от времени дезинтеграции, от среды, в которой суспендировались клетки и велось их разрушение и экстракция белков, от соотношения размеров стакана (диаметр центрифужной пробирки) к размерам ротационного устройства (диаметр кольца), от отношения объёма суспензии к объёму бус  $V_c : V_k$ . Степень дезинтеграции оценивали микроскопически по выходу белка. В качестве дезинтегратора использовали размельчитель тканей РТ-2 с регулируемым числом оборотов и гомогенизатор тип 324 (Польша). Мешалка имела форму кольца диаметром 20 мм. Экстрагентами служил фосфатный буфер 0,07 М рН-7,4 и 0,1н NaOH. Для этого 100 мг лиофильно высушенной биомассы суспендировали в 5 мл экстрагирующего раствора.

Суспензию переносили в центрифужные пробирки со сферическим дном, куда были внесены 5 мл стеклянных микробус. В этих пробирках велась дезинтеграция.

Из рис. 1-3 видно, что степень разрушения клеток хлореллы, коккспедии и синехококкуса зависит от числа оборотов ротационного устройства и отношения диаметра кольца к диаметру сосуда (стакана), в котором велась дезинтеграция.

Результаты опытов показали, что оптимальными условиями дезинтеграции, при которых разрушается более 95% клеток, судя по микроскопическим данным (для хлореллы, коккспедии и синехококкуса) являются следующие:

1. Плотность суспензии 20-25 мг/мл сухой биомассы
2. Соотношение объема бус к объему суспензии 1:1
3. Соотношение ротационного устройства (который представляет собой кольцо) к диаметру стакана дезинтегратора 0,7
4. Число оборотов ротационного устройства  $9 \cdot 10^3$  об/мин.
5. Время дезинтеграции 16 мин.

На рис. 4. показана зависимость выхода белка от времени дезинтеграции.

Биологическая ценность белков одноклеточных организмов оценивалась по фракционному составу в сравнении полноценными традиционными белками мяса (рис. 5).

Распределение белков мяса сильно сдвинуто в сторону цитоплазматических и легко растворимых в слабых солевых и щелочных растворах белков. На долю белков 1-ой и 2-ой фракции, наиболее доступных пищеварительным ферментам приходится 82,7% общего белка. Здесь же сосредоточена основная масса незаменимых аминокислот.

Белки водородных бактерий и хлореллы распределены по фракциям таким образом, что около половины общего белка прихо-

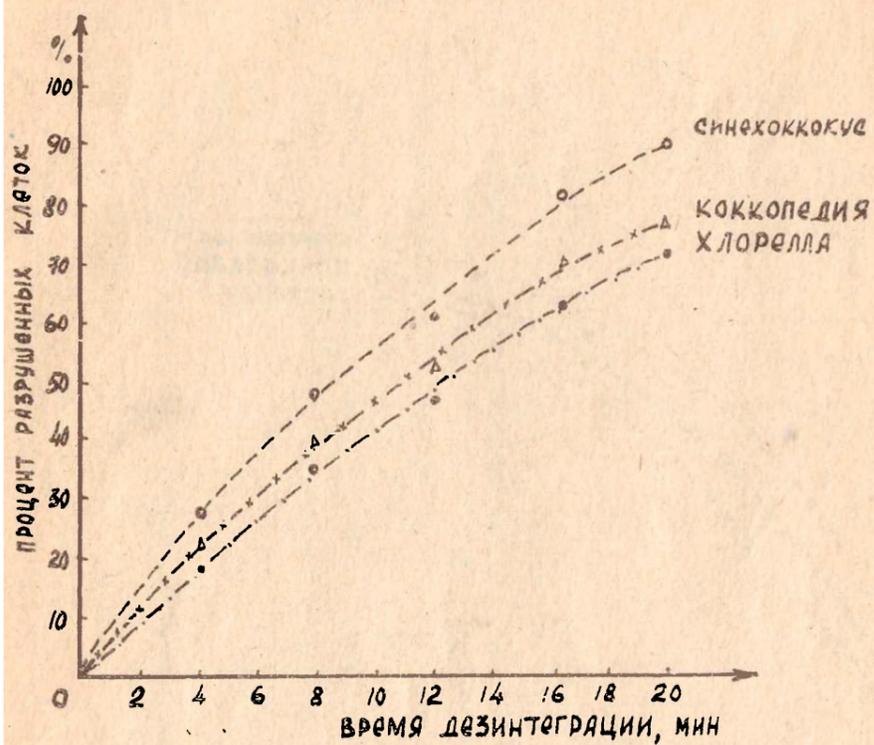


Рис.1. Степень разрушения клеток  
число оборотов  $6 \cdot 10^3$  мин,  $V_c:V_0 = 1:1$   $\frac{\phi_{кольца}}{\phi_{стакана}} = 0,4$

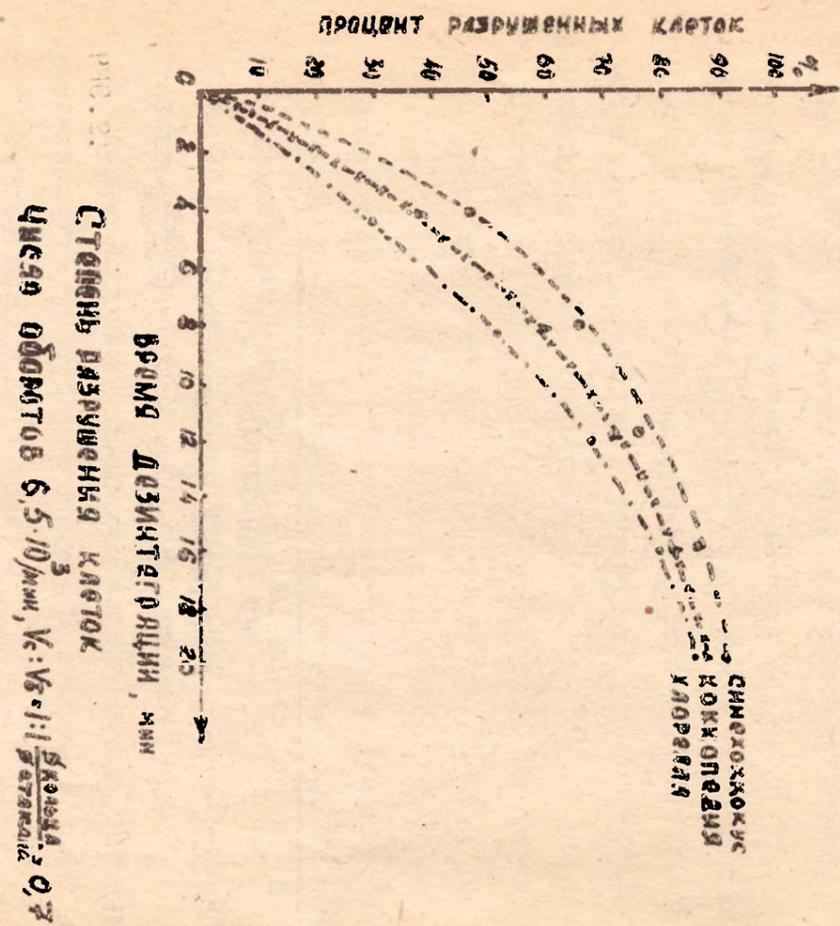


Таблица 1

БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СИНЕЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ И ХЛОРЕЛЛЫ (% НА АБС. СУХ. ВЕЩЕСТВО)

Углеводн типа:

Вид водорослей	Углеводн типа:				Свобой постоин	Липидн	РНК	ДНК	РНК+ДНК	Аскорби-новья ки-слота	Каротин	Тиамин	Рибофлавин
	Водораство-римне саха-ре	Крахмала	гемицеллю-лов	клетчатни									
	м ± м	м ± м	м ± м	м ± м									
<i>Synechococcus</i>	2,8 ± 0,6	5,1 ± 1,1	10,9 ± 1,7	2,2 ± 0,6	51,9 ± 3,0	8,3 ± 0,5	3,4 ± 0,2	0,3 ± 0,04	3,7 ± 0,1	205	107	0,7	3,4
<i>Synechococcus</i>	2,4 ± 0,3	3,8 ± 0,4	7,7 ± 0,7	0,8 ± 0,1	62,5 ± 1,3	10,7 ± 0,9	3,7 ± 0,3	0,8 ± 0,03	4,5 ± 0,3	195	186	2,0	4,0
<i>Spirulina</i>	4,1 ± 0,5	3,7 ± 0,7	4,8 ± 0,3	0,4 ± 0,1	56,2 ± 1,5	11,2 ± 0,7	3,2 ± 0,2	0,7 ± 0,10	3,9 ± 0,1	212	234	4,7	6,6
<i>Chlorella</i> <sup>+</sup>	2,7 ± 1,2	2,4 ± 0,6	5,7 ± 1,0	0,8 ± 0,3	57,5 ± 1,2	14,4 ± 1,6	3,9 ± 0,5	0,8 ± 0,10	4,7 ± 0,3	240	166	4,3	5,8
<i>Chlorella</i> <sup>++</sup>	3,4 ± 1,5	4,0 ± 0,2	8,6 ± 0,8	0,6 ± 0,1	50,6 ± 0,6	21,5 ± 2,0	3,1 ± 0,3	0,7 ± 0,08	3,8 ± 0,3	120	126	3,8	4,8
<i>Platymonas</i>	3,1 ± 0,9	7,3 ± 1,3	2,8 ± 1,2	0,6 ± 0,2	41,2 ± 3,1	18,2 ± 1,5	2,6 ± 0,3	0,7 ± 0,1	3,3 ± 0,3	54	153	2,0	3,0
<i>Cyanidium</i>	1,7 ± 1,0	5,6 ± 0,7	5,5 ± 1,4	0,7 ± 0,4	57,1 ± 4,2	10,3 ± 1,3	3,0 ± 0,4	0,3 ± 0,08	3,3 ± 0,4	66	112	2,2	4,8
<i>Porphyridium</i>	3,1 ± 1,2	6,5 ± 1,4	6,6 ± 0,8	0,8 ± 0,3	35,4 ± 2,4	7,7 ± 1,3	1,7 ± 0,2	0,2 ± 0,06	1,9 ± 0,2	171	28	0,9	1,5

+ периодическая культура  
++ непрерывная культура

Таблица 2

АМИНОКИСЛОТЫЙ СОСТАВ ОДНОКЛЕТОЧНЫХ ВОДОРОСЛЕЙ (в % на весовую долю сухого вещества)

Аминокислоты:	М ± m			
	Spizulina	Synochococcus	Soccosordia	Chlorella некуль- турная
Лизин	2,64±0,20	3,13±0,15	2,40±0,15	3,33±0,15
Гистидин	0,84±0,12	0,84±0,10	0,66±0,14	1,09±0,16
Аргинин	3,69±0,12	4,06±0,15	3,44±0,27	3,14±0,10
Аспарагиловая кислота	5,30±0,09	6,12±0,25	4,44±0,30	4,27±0,20
Треонин	2,81±0,13	3,46±0,05	2,34±0,10	2,23±0,10
Серин	2,64±0,04	2,71±0,10	2,26±0,10	2,21±0,05
Глютаминовая кислота	8,29±0,14	8,16±0,20	6,39±0,60	6,45±0,25
Пролин	2,12±0,12	3,08±0,20	2,36±0,20	3,06±0,06
Глицин	2,82±0,12	3,11±0,05	2,21±0,15	3,01±0,05
Аланин	4,17±0,09	5,81±0,10	3,44±0,25	4,11±0,10
Цистин	0,38±0,04	0,47±0,03	0,73±0,01	0,48±0,05
Валин	3,16±0,18	3,26±0,05	2,94±0,30	2,65±0,05
Изолейцин	0,80±0,16	1,16±0,10	0,77±0,05	1,01±0,02
Лейцин	2,71±0,11	2,78±0,05	1,74±0,15	1,63±0,05
Тирозин	4,94±0,29	5,53±0,15	3,53±0,25	4,10±0,08
Фенилаланин	2,13±0,14	2,34±0,20	2,58±0,10	1,59±0,06
Триптофан	2,21±0,10	2,67±0,10	1,87±0,15	2,22±0,05
Сумма аминокислот	0,63±0,03	0,67±0,06	0,52±0,07	0,64±0,13
Сумма незаменимых	52,85	59,36	44,86	47,22
% незаменимых от общей	19,90	22,66	16,13	17,89
суммы	37,64	38,17	35,95	37,88

Таблица 3

АМИНОКИСЛОТЫЙ СОСТАВ БЕЛКОВ ВОДОРОСЛЕЙ, ЛИШЕРН И КАЗЕИНА (% аминокислот от общей суммы)

Аминокислоты:	М ± m			
	Spizulina	Synochococcus	Soccosordia	Chlorella перико- культур- ная
Лизин	4,99	5,27	5,34	7,05
Гистидин	1,55	1,41	1,91	1,81
Аргинин	6,98	6,83	7,66	7,74
Аспарагиловая	10,02	10,30	9,89	1,49
Треонин	5,31	5,12	5,21	4,88
Серин	5,37	4,56	5,03	4,86
Глютаминовая	15,68	13,74	14,24	13,12
Пролин	4,76	5,18	5,30	6,48
Глицин	5,33	5,23	4,92	5,74
Аланин	7,88	9,78	1,66	6,34
Цистин	0,71	0,79	1,61	9,18
Валин	5,97	5,49	6,55	1,37
Изолейцин	1,51	1,95	1,71	5,41
Лейцин	5,12	4,68	3,87	2,16
Тирозин	9,34	9,31	7,91	3,45
Фенилаланин	4,02	3,94	5,75	8,91
Триптофан	4,18	4,49	4,70	3,13
Сумма	1,19	1,12	1,15	4,41
Сумма незаменимых	1,19	1,12	1,15	1,35
% незаменимых от общей	100	100	100	100
суммы	1,19	1,12	1,15	1,35

Аминокислоты:	М ± m			
	Листерн	Казеин	Platimomas	Synochococcus
Лизин	5,92	7,33	5,98	5,72
Гистидин	2,10	2,20	1,71	1,54
Аргинин	5,62	3,19	7,30	7,79
Аспарагиловая	12,18	7,11	10,81	9,98
Треонин	5,40	4,22	4,95	5,45
Серин	5,08	5,72	4,71	5,74
Глютаминовая	12,43	22,20	14,04	14,82
Пролин	5,40	10,41	6,04	5,72
Глицин	6,00	1,88	6,28	4,38
Аланин	6,96	2,96	8,27	7,06
Цистин	0,87	0,42	1,21	1,48
Валин	5,57	5,72	5,01	5,31
Изолейцин	1,66	2,47	2,05	2,23
Лейцин	4,35	4,10	3,29	3,81
Тирозин	9,66	9,39	7,91	7,87
Фенилаланин	3,69	4,75	3,56	5,90
Сумма	5,78	4,62	4,95	4,26
Сумма незаменимых	1,58	1,32	1,30	0,95
% незаменимых от общей	100	100	100	100
суммы	1,58	1,32	1,30	0,95

Содержание жирных кислот в водорослях (% на аос. сух. вещество).

Таблица 7

	Chlorella		Spirulina	Coccoredia	Synesococcus	Cyanidium	Platymonas	Porphyridium
	непрерывная культура	периодическая культура						
12:0	-	-	0,01	0,01	0,02	сл.	0,02	сл
неид.	-	-	-	-	-	-	0,01	вл
13:0	-	-	-	-	-	-	0,03	сл
изо 14:0	-	-	-	-	-	-	0,03	сл
14:0	0,03	0,03	0,01	0,03	0,14	0,02	0,08	0,02
14:1	-	-	-	-	-	-	0,02	0,01
15:0	-	-	-	-	-	0,01	0,04	0,01
изо 16:0	-	-	-	0,02	0,05	-	0,03	сл
16:0	1,32	1,63	1,65	1,62	2,38	1,61	1,69	0,95
16:1	0,04	сл	0,03	сл	0,29	0,08	0,26	0,06
Δ <sup>5</sup> 16:1	0,05	-	-	-	-	-	0,22	0,06
17:0	-	-	-	0,02	0,04	0,03	0,08	сл
16:2	0,62	0,89	-	-	-	-	0,13	-
16:3	0,44	1,17	-	-	-	-	0,05	0,02
16:4	-	-	-	-	-	-	0,05	-
18:0	0,04	0,05	0,06	0,29	0,25	0,18	1,07	0,07
18:1	0,22	0,23	0,19	0,66	1,33	1,01	1,39	0,19
18:2	1,08	1,52	0,40	1,45	-	1,06	0,54	0,17
18:3	0,76	1,38	-	-	-	0,48	0,69	0,03
γ 18:3	-	-	0,45	-	-	-	0,99	0,01
18:4	-	-	-	-	-	-	0,01	сл
20:2	-	-	-	-	-	-	-	0,01
20:4	-	-	-	-	-	-	0,03	0,16
20:5	-	-	-	-	-	-	0,14	0,05
Сумма насыщенн.	1,39	1,71	1,72	1,99	2,88	1,85	3,09	1,05
Сумма ненасыщенн.	3,21	5,19	1,08	2,11	1,62	2,65	4,51	0,82
кислот								
12:0-лауриновая		15:0-пентадекановая		17:0-гептадекановая		18:0-стеариновая		18:4-октадекатетраеновая
13:0-тридекановая		изо 16:0-изопальмитиновая		16:2-гексадекадиеновая		18:1-олеиновая		20:2-эйковаиеновая
изо 14:0-изомиристиновая		16:0-пальмитиновая		16:3-гексадекатриеновая		18:2-линолевая		20:4-арахидиновая
14:0-миристиновая		16:1-пальмитолеиновая		16:4-гексадекатетраеновая		18:3-линоленовая		20:5-эйкозапентаеновая
14:1-тетрадеценовая		Δ <sup>5</sup> 16:1-транс-3-гексадеценовая				γ 18:3-γ-линоленовая		

Содержание жирных кислот в водорослях (% от суммы жирных кислот, M ± m).

Таблица 8

	Chlorella		Spirulina	Coccoredia	Synesococcus	Cyanidium	Platymonas	Porphyridium
	непрерывная культура	периодическая культура						
12:0	-	-	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,2	сл.	0,3 ± 0,1	сл
неидент.	-	-	-	-	-	-	0,1 ± 0,0	сл
13:0	-	-	-	-	-	-	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,0
изо 14:0	-	-	-	-	-	-	0,4 ± 0,1	0,1 ± 0,0
14:0	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,8 ± 0,1	3,2 ± 1,1	0,4 ± 0,1	1,1 ± 0,6	1,3 ± 0,2
14:1	-	-	-	-	-	-	0,2 ± 0,1	0,6 ± 0,1
15:0	-	-	-	-	-	0,3 ± 0,1	0,5 ± 0,2	0,6 ± 0,1
изо 16:0	-	-	-	0,4 ± 0,2	1,2 ± 0,4	-	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1
16:0	28,8 ± 1,7	23,7 ± 2,0	58,5 ± 6,5	39,6 ± 1,5	52,8 ± 4,1	35,8 ± 1,4	22,3 ± 5,9	51,4 ± 1,1
16:1	0,9 ± 0,2	сл	1,2 ± 0,5	сл	6,4 ± 1,2	1,8 ± 0,1	3,4 ± 1,0	3,4 ± 0,1
Δ <sup>5</sup> 16:1	1,2 ± 0,6	-	-	-	-	-	2,9 ± 0,6	3,4 ± 0,1
17:0	-	-	-	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,6	0,7 ± 0,1	1,1 ± 0,3	сл
16:2	13,4 ± 2,1	12,9 ± 0,7	-	-	-	-	1,7 ± 0,8	-
16:3	9,5 ± 1,2	16,9 ± 1,2	-	-	-	-	0,7 ± 0,2	0,9 ± 0,2
16:4	-	-	-	-	-	-	0,6 ± 0,2	-
18:0	0,8 ± 0,3	0,7 ± 0,1	2,1 ± 0,4	7,2 ± 0,4	5,5 ± 1,3	4,0 ± 0,7	14,1 ± 4,4	3,9 ± 0,1
18:1	4,6 ± 0,8	3,3 ± 1,4	6,8 ± 0,8	16,0 ± 0,6	29,7 ± 5,5	22,4 ± 3,7	18,3 ± 3,1	10,5 ± 0,2
18:2	23,7 ± 2,8	22,1 ± 0,8	14,8 ± 2,5	35,2 ± 1,8	-	23,9 ± 5,0	7,1 ± 1,0	9,2 ± 0,1
18:3	16,5 ± 3,0	20,0 ± 1,0	-	-	-	10,7 ± 3,9	9,1 ± 0,8	1,7 ± 0,1
γ 18:3	-	-	16,2 ± 4,8	-	-	-	13,0 ± 2,6	0,5 ± 0,1
18:4	-	-	-	-	-	-	0,1 ± 0,0	0,2 ± 0,0
20:2	-	-	-	-	-	-	-	0,6 ± 0,1
20:4	-	-	-	-	-	-	0,4 ± 0,1	8,5 ± 1,3
20:5	-	-	-	-	-	-	1,8 ± 0,3	2,8 ± 0,5
Сумма насыщенн.	30,2	24,8	61,4	48,8	63,9	41,2	40,7	57,7
Сумма ненасыщенн.	69,8	75,2	38,6	51,2	36,1	58,8	59,3	42,3

Таблица 9

Содержание витаминов в однолетних растениях (сеedsобная часть), выращенных в фитотроне.

Культура	Сорт	Возраст (сутки)	Содержание, мг%		С	каротины
			В <sub>1</sub>	В <sub>2</sub>		
Морковь	Нантская	69	0,51/0,07	1,09/0,15	33,7/8,8	41,7/5,8
	Мантене	75	0,40/0,05	0,95/0,13	43,3/5,5	36,8/4,9
Свёкла	Бордо	65	0,18/0,03	0,97/0,16	62,9/10,2	0
Редис	Красный Великан	30	0,49/0,03	1,01/0,07	517,6/35,2	0
	Вировский белый	22	0,59/0,04	1,64/0,10	563,0/33,5	0
Репка	Петровская	60	0,35/0,04	1,54/0,14	558,1/47,0	0
Укроп		26	0,82/0,09	3,78/0,40	525,2/56,2	26,2/2,8
Капуста листовая	Пекинская		0,55/0,05	2,24/0,19	462,4/39,3	27,1/2,3
Лук-бату		30	0,79/0,00	3,30/0,33	486,7/48,7	17,2/1,7
Огурец	Дядя Степа		0,55/0,02	1,89/0,07	252,6/9,6	1,6/0,06
Пшеница	232		0,38/0,35	0,67/0,62	0	0
Чуфа			0,62/0,58	0,57/0,54	0	0
Хлорелла непрерывная			3,8/0,95	4,7/1,17	123/30,7	126/31,5
периодическая			4,3/1,07	5,9/1,47	242/60,5	166/41,5
Спирulina			4,8/1,20	6,6/1,65	212/53,0	234/50,5
Синефобинус			2,0/0,50	4,1/1,02	195/48,7	188/46,5
Коккопедис			0,7/0,17	3,4/0,86	295/51,2	107/28,7
Циклидум			2,2/0,45	4,3/0,96	66/13,5	112/22,2
Платимонас			2,0/0,28	3,0/0,42	54/7,6	153/21,4
Порфиридиум			0,9/0,08	1,5/0,17	171/15,6	28/2,5
Водородные бактерии			4,4/1,1	5,5/1,37	0	0
Делеобактерии			1,0/0,27	4,0/1,06	0	0

Примечание: первая цифра - результат на абс. сух. вещество, вторая - на сырое вещество.

Таблица 12

Общие потребности человека в пищевых веществах и степень обеспеченности ими за счет хлореллы и водородных бактерий

Пищевые вещества и суточная потребность	% обеспеченности за счет	
	хлореллы	водородных бактерий
Белки в (г) 80-100	403-322	558-446
Аминокислоты в (г):		
триптофан 1	510	626
лейцин 4-6	717-478	963-342
изолейцин 3-4	383-267	687-500
валин 4	437	714
треонин 2-3	790-527	1184-789
лизин 3-5	643-386	1044-623
метионин 2-4	345-172	590-295
фенилаланин 2-4	715-357	990-495
гистидин 2	295	439
аргинин 6	417	545
цистин 2-3	221-147	126-84
тирозин 3-4	336-252	540-405
аланин 3	986	1353
серин 3	523	600
глутаминовая 16	354	351
аспарагиновая 6	510	746
пролин 5	370	410
гликокол 3	683	902
Нуклеиновые кислоты +) 2	1425	4500
углеводн 400-500	30-24	12-10
том числе сахар 100	25	18
Балластные вещества ++) 25	276	55
Жиры 80-100	201-161	67-54
Полиненасыщенные жирные кислоты 5-10	435-218	0
Фосфолипиды 5	346	548
Минеральные вещества в (мг):		
кальций 800-1000	56-45	125-100
фосфор 1000-1500	1042-694	1324-883
натрий 1000-3000	19-13	31-20
сера 800-1000	590-472	562-453
калий 2500-5000	4520-225	163-84
магний 300-500	1300-780	864-518
железо 15	2150	7330
цинк 10-15	300-200	619-412
марганец 5-10	2700-1350	648-324
хром 2-2,5	113-75	720-480
медь 2	900	1080
кобальт 0,1-0,2		288-144
молибден 0,5	75000	4752
Витамины		
аскорбиновая кислота 70-100	1285-900	0
тиамин 1,5-2,0	1900-1425	2112-1584
рибофлавин 2,0-2,5	1725-1380	1980-1584
никотиновая кислота 15-25	3500-2100	7200-4320
фолиевая кислота 0,1-0,5	25500-5100	20880-4176

+ ) потребность не установлена; поступление с пищей не должно превышать 2 г/сутки.

++ ) сумма клетчатки и гемицеллюлозы.

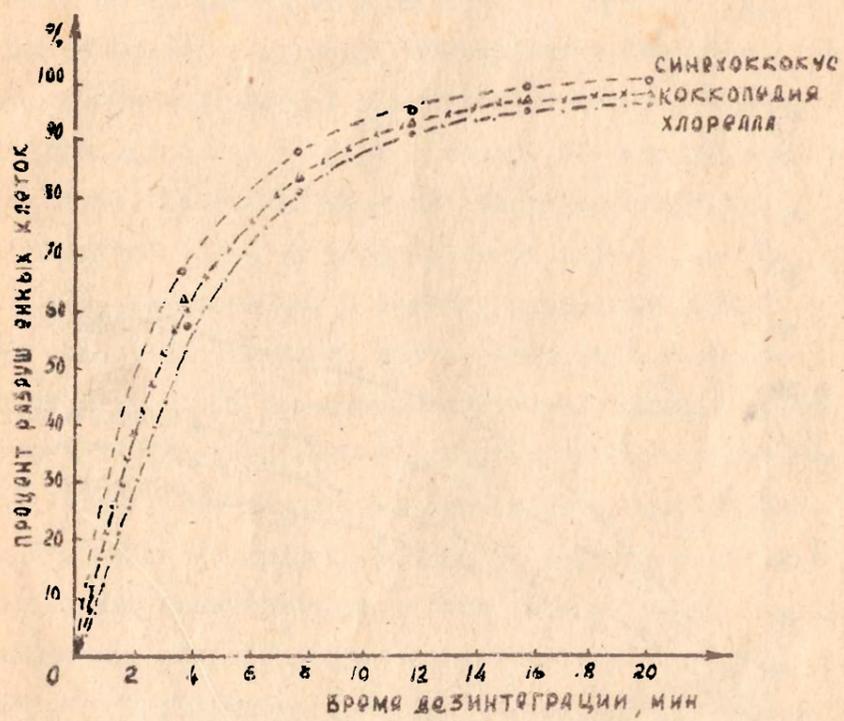


РИС. 3. Степень разрушения клеток  
число оборотов  $9 \cdot 10^3$  мин,  $V_c:V_B=1:1$   $\frac{V_{кольца}}{V_{стакан}} = 0,7$

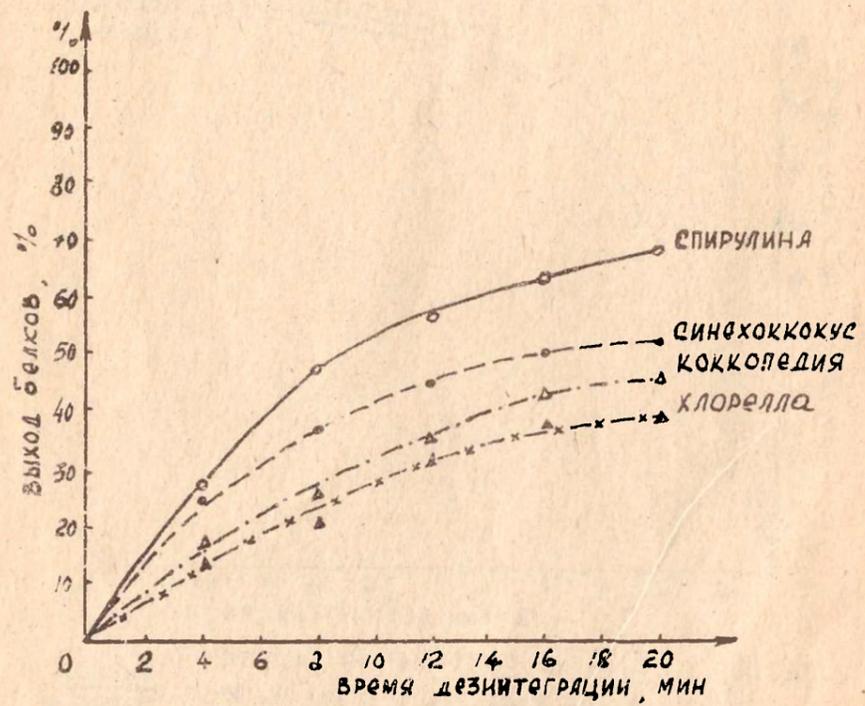


Рис. 4. Выход белков при 1 часовой экстракции фосфатным буфером pH-7,4

дится на 3-ю и 4-ю фракции т. е. на структурные белки, экстрагирующиеся щелочью. Эти белки менее доступны протеазам и т. о. хуже перевариваются, чем белки 1-ой и 2-ой фракций.

Питательная ценность белков оценивалась также по их атакуемости протеолитическими ферментами *in vitro* (50). Проведено сравнительное исследование переваривания пепсином и трипсином биомассы микроорганизмов и выделенных из них белков. Выделение белка проводилось в течение 1 часа 0,4% щелочью при комнатной температуре. Экстрагируется 83% белка из спирулины, 79% - из синехококкуса, 69% - из водородных бактерий, 59% - из коккопедии и 43% - из хлореллы. О степени протеолиза судили по увеличению содержания аминного азота в переваре и выражали его в процентах; за 100% принимали количество аминного азота, образовавшегося при кислотном гидролизе образцов. Переваривание проводили при 37° пепсином 3 часа и затем ещё 3 часа - трипсином. Как видно из приводимых данных неразрушенные спирулина и синехококкус перевариваются лучше, чем коккопедия, водородные бактерии или хлорелла. Это относится также и к разрушенной культуре и к щелочному экстракту белка. Объяснение этих данных заключается по-видимому в более высоком содержании в спирулине и синехококкусе растворимых белков по сравнению с другими рассмотренными микроорганизмами (рис. 4.). Как известно, свободные белки лучше перевариваются чем структурные. Нативная культура водородных бактерий лучше переваривается пепсином, чем коккопедия и хлорелла, но после воздействия трипсина разница в перевариваемости становится незначительной. В то же время все неразрушенные микроорганизмы атакуются пепсином и трипсином хуже, чем казеин.

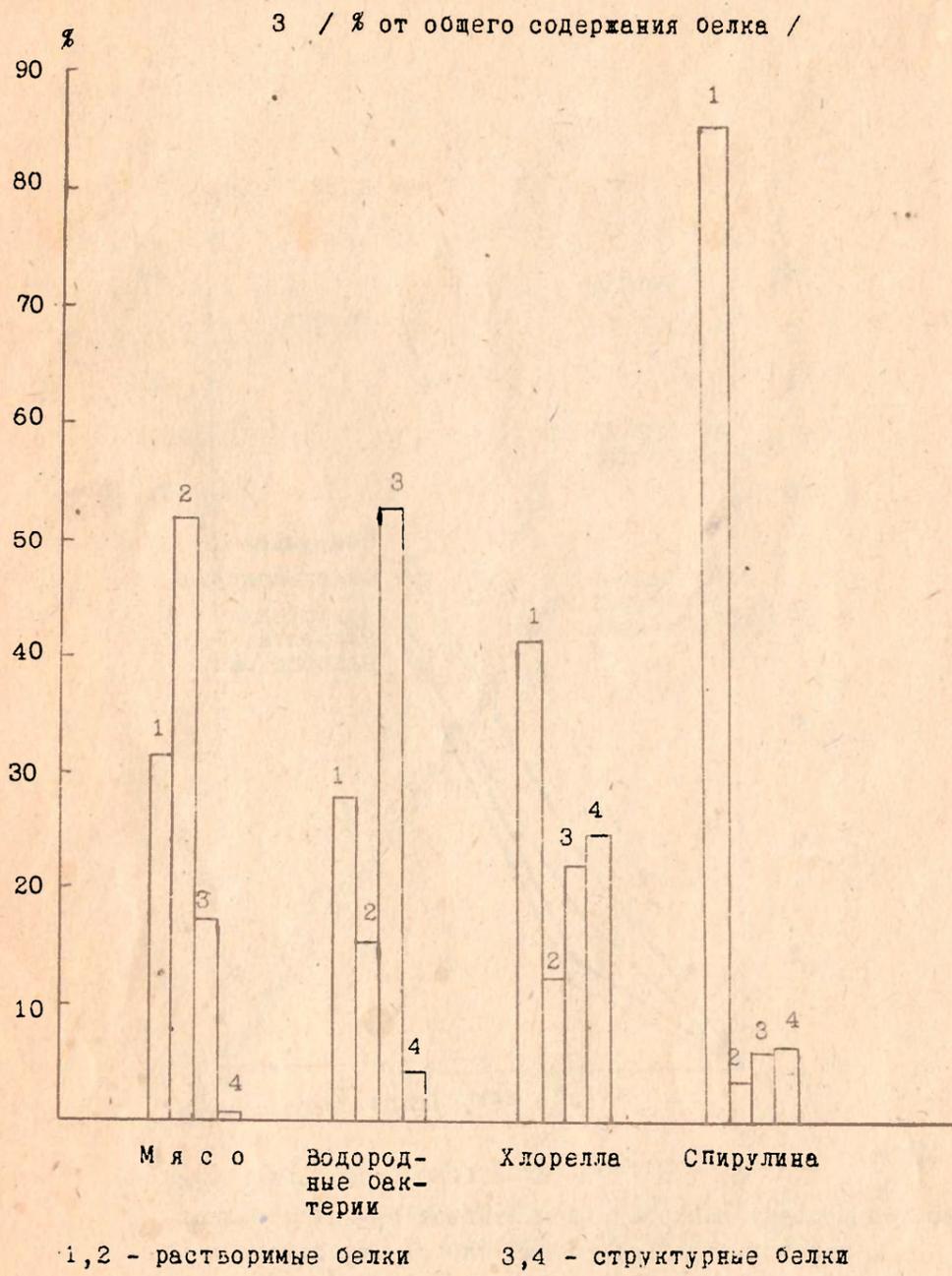
Деинтеграция микроорганизмов значительно сказывается на

их способности перевариваться пепсином, но почти не сказывается на перевариваемости трипсином. Это происходит по-видимому потому, что при разрушении клеточных оболочек облегчается доступ пепсина внутрь клетки к белковым молекулам и процесс ферментативного гидролиза резко ускоряется. Частично разрушенные пепсином белковые структуры, затем подвергаются воздействию трипсина, но способность белков перевариваться пепсином и трипсином имеет по-видимому предел который достигается во всех случаях по крайней мере к 6-ому часу протеолиза. После разрушения белки биомассы спирулины и синехококкуса перевариваются пепсином почти также как и казеин, а водородных бактерий, коккопедии и хлореллы - хуже.

Экстракция белка щелочью ещё более нарушает структурную целостность и это сказывается на способности белков перевариваться пепсином. Перевариваемость белков спирулины и синехококкуса пепсином значительно улучшилась. Трипсином выделенные белки атакуются также как и разрушенная биомасса. Очень близка суммарная перевариваемость пепсином и трипсином выделенных белков спирулины и синехококкуса с одной стороны и коккопедии, водородных бактерий и хлореллы - с другой (рис. 6, 7).

Кроме того исследовался фракционный состав белков хлореллы и спирулины по схеме, принятой для разделения белков мяса и водородных бактерий (52, 53). Из рис. 5 видно, что содержание растворимых и структурных белков в хлорелле примерно одинаково, в то время как в спирулине на долю растворимого белка приходится подавляющее количество общего белка биомассы. Хлорелла отличается от мяса и водородных бактерий большим содержанием белков 1-ой фракции, но она менее богата белками 2-ой фракции.

Рис.5. ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ БЕЛКОВ ГОВЯЖЬЕГО МЯСА, ВОДОРОДНЫХ БАКТЕРИЙ, ХЛОРЕЛЛЫ И СПИРУЛИНЫ



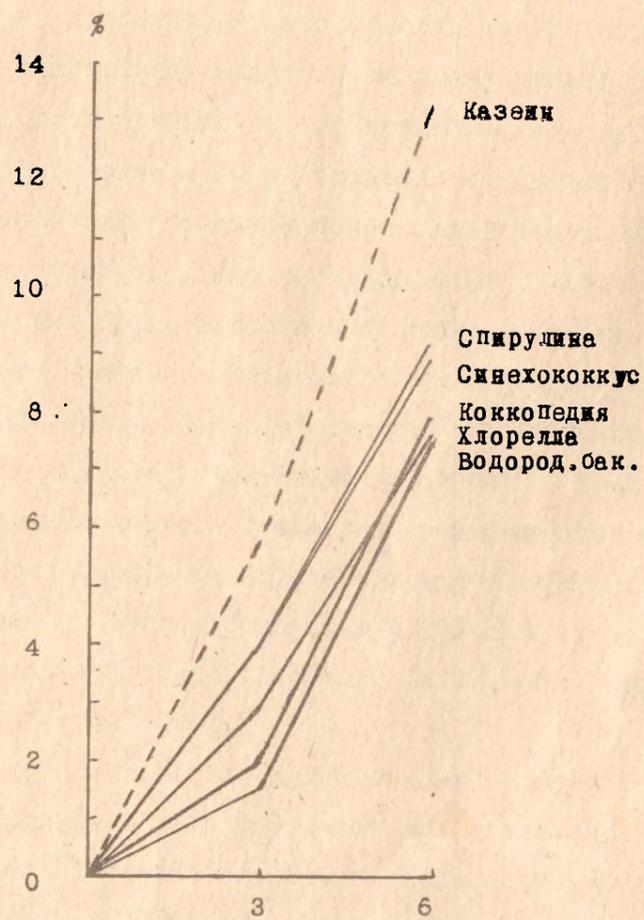


Рис. 6. Процент разорванных пептидных связей в белках неразрушенных микробных клеток при действии пепсина и трипсина / по методу (50) /

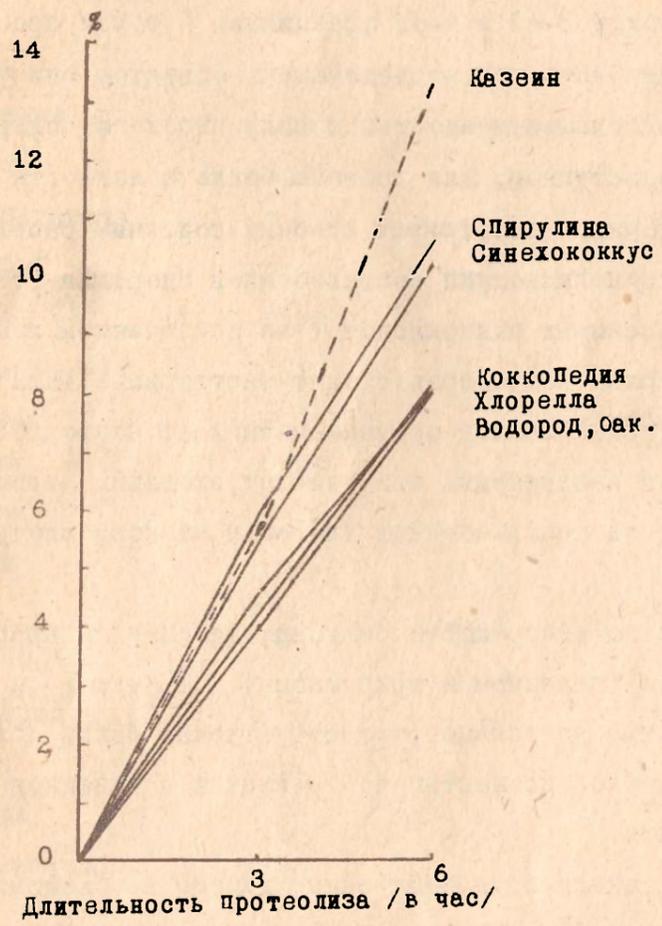


Рис. 7. Процент разорванных пептидных связей в белках разорванных микробных клеток при действии пепсина и трипсина / по методу (50) /

особенно по сравнению с мясом. По содержанию белков 3-ей фракции хлореллы превосходит мясо, но уступает водородным бактериям, в то же время она обладает самым высоким по сравнению с остальными исследованными микроорганизмами и мясом содержанием белков 4-ой фракции. В хлорелле почти половина общих белков составляют структурные, которые в свою очередь примерно поровну распределены между 3-ей и 4-ой фракциями. С точки зрения сравнительной оценки качества исследованных объектов спирулина должна обладать наибольшей ценностью в силу высокого содержания растворимого легкодоступного для протеаз белка и легкости его извлечения из клеточного гомогената слабыми солевыми растворами.

Исследовался аминокислотный состав белков хлореллы (табл.10). По содержанию незаменимых аминокислот (за исключением лизина и цистина) структурные белки превосходят растворимые. Малая доступность структурных белков протеазам снижает возможности усвоения организмом незаменимых аминокислот, входящих в состав этих фракций, в случае использования хлореллы на корм скоту и в пищу.

Анализ данных по атакуемости белковых фракций пищеварительными ферментами (пепсином и трипсином) *in vitro*, приводимых в табл.11 также доказывает, что структурные белки обладают низкой биологической ценностью по сравнению с казеином и растворимыми белками.

Таким образом, анализируя полученные данные необходимо сделать вывод о том, что значительное содержание структурных белков особенно наиболее труднорастворимых, входящих в состав 4-ой фракции, в сочетании с низкой атакуемостью структурного белка пищеварительными протеазами снижает биологическую ценность общего белка хлореллы. В то же время общий белок спирулины об-

Таблица 10

Аминокислотный состав белков фракций хлореллы (% аминокислот от их общей суммы).

Аминокислоты	Фракции белков			
	1	2	3	4
Лизин	7,81	8,76	7,19	5,75
Гистидин	1,31	1,75	4,77	1,46
Аргинин	6,29	8,00	7,78	5,54
Аспарагиновая	7,64	9,09	10,91	10,32
Треонин	2,98	4,16	4,59	3,66
Серин	2,76	3,72	3,97	3,50
Глютаминовая	16,10	11,61	12,19	12,72
Пролин	15,52	11,06	7,69	5,57
Глицин	5,79	7,34	6,83	7,52
Аланин	14,53	11,39	10,23	10,96
Цистин	0,89	1,20	0,18	0,33
Валин	4,40	4,60	5,22	5,87
Метионин	0,74	0,44	0,92	1,26
Изолейцин	2,28	2,63	3,13	3,63
Лейцин	5,68	7,01	9,33	11,30
Тирозин	2,22	3,07	3,25	3,69
Фенилаланин	3,05	4,16	4,98	6,55

ладает высокой биологической ценностью из-за значительного содержания растворимого белка, хорошо атакуемого протеазами.

В заключение отметим степень обеспеченности человека различными пищевыми веществами за счет водородных бактерий и хлореллы. В качестве отправного момента в таблице 12 взято количество биомассы водородных бактерий (720г) и хлореллы (750г), необходимое для связывания выделяемой человеком углекислоты. Из таблицы 12 видно: большой избыток белков, нуклеиновых кислот, фосфолипидов, витамина В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, фолиевой и никотиновой кислот, фосфора, серы, магния, железа, меди, цинка, марганца,

Таблица 11.

Атакуемость белков хлореллы, спирулины и казеина протеолитическими ферментами *in vitro*

Объект	Фракции белков	Атакуемость протеазами (%)	
		пепсином	пепсином и трипсином
Хлорелла	1	33,0 <sub>±</sub> 2,0	38,0 <sub>±</sub> 2,1
	2	32,5 <sub>±</sub> 1,9	37,9 <sub>±</sub> 2,0
	3	17,2 <sub>±</sub> 2,6	20,5 <sub>±</sub> 2,1
	4	14,9 <sub>±</sub> 1,7	17,9 <sub>±</sub> 1,6
Спирулина	1	33,3 <sub>±</sub> 2,6	37,6 <sub>±</sub> 0,4
Казеин	Суммарный белок	42,9 <sub>±</sub> 0,6	48,0 <sub>±</sub> 1,0

Примечание: Атакуемость белков оценивалась по методу (27).

хрома, молибдена, кобальта и дефицит углеводов. жиров (водородные бактерии), натрия, кальция (хлорелла). Препятствием для употребления биомассы одноклеточных организмов в пищу является высокое содержание нуклеиновых кислот, т. к. продукты метаболизма пуринов в повышенных концентрациях вредны для организма. Ни один из изученных организмов по содержанию нуклеиновых кислот не может быть использован в пищу в количествах, удовлетворяющих потребности человека в белках хотя бы на 50% без удаления избытка нуклеиновых кислот. Количество абс. сух. биомассы, которое может быть использовано человеком без вреда по содержанию нуклеиновых кислот (если снять другие ограничения) будет следующее: водородные бактерии - 10-15г, микроводоросли - 50-70г.

Одноклеточные организмы представляют перспективный продукт биосинтеза для пищевого использования. Однако имеющееся диспропорции между потребностями человека и составом биомассы, требуют исследований по технологической переработке и биохимической трансформации их биомассы и испытанию пищевых достоинств выделенных компонентов, в частности белка, 120г которого может полностью обеспечить человека во всех незаменимых аминокислотах.

Использование одноклеточных организмов как источника пищевого белка в настоящее время ограничено в основном дефицитом биомассы или выделенных из нее белковых препаратов для доказательства их безвредности и полноценности. Поэтому не случайно, что среди многих видов микроорганизмов лишь о некоторых имеются сведения по кормовой и пищевой пригодности (дрожжи, хлорелла, сцинедесмус, спирулина, водородные бактерии). Наиболее полные медико-биологические исследования проведены с использованием дрожжей (51). Что касается животноводства, то здесь вклад ми-

микроводорослей в космическую базу в некоторых районах уже значителен (38). Существующие трудности в выделении белка из микроорганизмов (прочная клеточная оболочка, комплексы белков с другими компонентами и т. д.) и низкие пищевые качества полученных до сих пор белковых препаратов не снимают задачу поиска новых микроорганизмов и путей их переработки с целью получения из них продукта, пригодного в пищу.

Не снимается задача разработки технологии непрерывного культивирования микроводорослей и других организмов-продуцентов пищевых веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисовский Г.М., Ян Н. А., Сипневская Э. К., Николайчук Л.П. Сакаш В.Г., Шиленко М.П. 1966. В сб.: Управляемый биосинтез. М., "Наука", 276.
2. Рерберг М.С., Воробьева Т.И. 1964. В сб.: Управляемое культивирование микроводорослей. М., "Наука", 110.
3. Терешкова Г.М., Ян Н.А., Козров Б.Г., Штоль А.А. 1973. В сб.: Управление биосинтезом микроорганизмов. Тезисы III Всесоюз. совещ. по управляемому биосинтезу и биофизике популяций. Красноярск, Изд-во Ин-та физики СО АН СССР, 1647
4. Козров Б.Г., Буданов А.С. 1964. Управляемое культивирование микроводорослей. М., "Наука", 8.
5. Громов Б.В. 1965. В сб.: Вопросы микробиологии. ИГУ, 125.
6. Тренкеншу Р.П., Белянин В.Н., Грибовская И.В. 1976. В сб.: Материалы IX Всес. рабочего совещ. по вопросу круговорота веществ в замкнутой системе на основе жизнедеятельности низших организмов. Киев, "Наукова думка", 135.
7. Зайцева Г.Н., Афанасьева Т.П. 1977. Биохимия, 22, вып. 6, 1034.
8. Белозерский А.Н., Проскуряков Н.И. 1951. Практическое руководство по биохимии растений. М., "Советская наука".
9. Биохимические методы в физиологии растений. 1971. М., "Наука".
10. Калачева Г.С., Трубацев И.Н. 1974. Физиология растений, 21, вып. 1, 56.
11. Спирин А.С. 1958. Биохимия, 23, 656.
12. Каротин (провитамин А). Методы определения. ГОСТ 6604-53, М.
13. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова-Иконникова М.И.,

- Ярош Н.П., Луговникова Г.А. 1972. Методы биохимического анализа растений. Л., "Колос", 105, 315.
14. Sanger F. 1949. Biochem. J., 44, 126.
15. Пиневиц В.В., Верзилин Н.Н., Михайлов А.А. 1970. Физиол. растений, 17, 1037.
16. Михайлов А.А., Мелешко Г.И., Борисова И.А., Андраш Н.Ф. 1973. В сб.: Управление биосинтезом микроорганизмов. Тезисы III Всес. совещ. по управляемому биосинтезу и биофизике популяций, Красноярск, Изд-во Ин-та физики СО АН СССР.
17. Клячко-Гурвич Г.Л. В сб.: Управляемый биосинтез. М., "Наука", 116.
18. Гительзон И.И., Садикова Г.И., Бородкина Л.Н., Базанова М.И. 1966. В сб.: Управляемый биосинтез. М., "Наука", 110.
19. Трубацев И.Н., Андреева Р.И., Мин Э.В., Калачева Г.С. 1969. Тезисы докл. II Всес. совещ. по управляемому биосинтезу и биофизике популяций. Красноярск, 17.
20. Барашков Г.К. 1972. Кн.: Сравнительная биохимия водорослей М., "Пищевая промышленность".
21. Красновский А.А., Евстигнеев В.Б., Брин Г.П., Гаврилова В.А. 1952. Докл. АН СССР, 82, № 6, 947.
22. Сисакян Н.М., Безингер Э.Н., Кивкуцан Ф.Р. 1954. Докл. АН СССР, 98, № 1, 111.
23. Покровский А.А. 1975. Вопросы питания. ВЗ. 25.
24. Кретович В.Л. 1975. Природа. №6. 9
25. Дамберг Б.Э., Гром К.П., Крамер Ю.Н., Шмидт А.А. 1964. Вопросы питания. ВЗ. 14.
26. Reissig H. 1958. Züchter 28. No.1, 51.
27. Покровский А.А., Ертанов И.Д. 1965. Вопросы питания. ВЗ, 38.

28. Альбицкая О.Н., Зайцева Г.Н., Горонкова О.И., Ошанина Н.П. Воронкова С.С. 1974. В сб.: Материалы VIII Всесоюзного рабочего совещания по вопросу круговорота веществ в замкнутой системе на основе жизнедеятельности низших организмов. Киев, "Наукова думка", 35.
29. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. 1974. Кн. Хлорелла. Ташкент изд. "ФАН", Узбекской ССР, 132.
30. Ключкина Н.С. 1969. Исследование биологической ценности протокочковых водорослей как возможного источника белка. Канд. дисс. М.
31. Абакумова И.А., Фофанов В.И. 1972. В сб.: Материалы VII Всесоюзного рабочего совещания по вопросу круговорота веществ в замкнутой системе на основе жизнедеятельности низших организмов. Киев, "Наукова думка", 3.
32. Nichols B.W., Wood J.B. 1968. Lipids, 3, 46.
33. Барашков Г.К. 1961. Химия синезеленых водорослей. Ботанический журнал. 46, 447.
34. Покровский А.А. 1974. Кн. Роль биохимии в развитии науки о питании М., "Наука", 122.
35. Киеветтер И.В., Грюнер В.А., Евтушенко В.А. 1967. Кн.: Переработка морских водорослей и других промысловых водных растений М.
36. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. 1974. В кн.: Хлорелла Ташкент, "ФАН".
37. Покровский А.А. 1972. Перспективы использования белков одноклеточных организмов. В сб.: Медико-биологические исследования углеводородных дрожжей М., "Наука", 9.
38. Грибовская И.В., Белянин В.Н. 1973. В сб.: Управление биосинтезом микроорганизмов. Тезисы III Всес. совещ. по управляемому биосинтезу и биофизике популяций. Красноярск,

- Изд-во Ин-та физики СО АН СССР, 115.
39. Ян Н.А. 1973. Там же, стр. 180.
40. Горюнова С.В., Ржанова Г.Н., Орловский В.К. 1969. Синезеленые водоросли. М., "Наука".
41. Маотро В.Г., Селяметов Р.А. 1974. В сб.: Тезисы научн. симпов. XI научно-координац. совещ. по теме "Изучение физиологии культивирования водорослей с высоким коэффициентом использования света". Л., ЛГУ, 35.
42. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т., Насруллаев У.Н., Якубов Х.Ф., Ельмуратов М. Там же, стр. 38.
43. Кучкарова М.А., Тулаганов А., Музафарова Д.А., Зарипов Э. Там же, стр. 24.
44. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т., Васиго Т.В., Буриев С. Там же, стр. 32.
45. Юзвенко В.Н. Там же, стр. 33.
46. Дилов Х. 1974. Физиолого-биохимические основы массового культивирования и перспективы микроводорослей в Болгарии. Автореф. докт. дис., София.
47. Ракитин В.Ю., Моносов Э.З., Прокофьева Н.В., Григорян А.Н. 1976. Прикладная биохимия и микробиология 12, В.2, 278.
48. Семененко В.Е., Касаткина Т.И. 1972. Физиология растений 19, В. 1, 169.
49. Рогозин С.В., Мамчис А.М., Вальковский Д.Г. 1974. Прикладная биохимия и микробиология 10, В.6, 841.
50. Сломинский Г.Л., Браудо Е.Е., Ертанов И.Д., Толстогузов В.В., Бондарева Э.С., Плащина И.Г. 1970. Вопросы питания, №6, 25.
51. Сб.: Медико-биологические исследования углеводородных дрожжей. Под редакц. академика Покровского А.А. М., "Наука", 1972.

52. Барашков В.А., Трубацев И.Н., Гительзон И.И. 1976.  
Вопросы питания. № 1, 73.
53. Ткаченко В.В., Махов А.А., Ткаченко А.В. 1969. Изв. АН  
СССР, Серия биол. наук. № 2, 285.