УДК 576.3

Родин Роман Васильевич

Магистр Тамбовского государственного технического университета

Россия, г.Тамбов

ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОВОДОРОСЛИ CHLORELLA VULGARIS

Аннотация: *В статье рассматривается подробное строение клетки микроводоросли Chlorella vulgaris. Приведен анализ строения клеточной стенки. Рассмотрено строение основных мембран клетки. Приведено строение мембранных белков и липидов.*

Ключевые слова: *зеленые водоросли, микроводоросль Chlorella vulgaris, клеточная стенка, мембранные белки и липиды.*

CHARACTERISTICS OF THE MICROALGAE CHLORELLA VULGARIS

Abstract: *The article discusses the detailed structure of the cell of the microalgae Chlorella vulgaris. The analysis of the structure of the cell wall is given. The structure of the main cell membranes is considered. The structure of membrane proteins and lipids is given.*

Keywords: *green algae, microalgae Chlorella vulgaris, cell wall, membrane proteins and lipids.*

Водоросли - сборная группа низших, преимущественно водных, растений, тело которых не расчленено на вегетативные органы (корень, стебель, лист), а представлено талломом, или слоевищем. По этой причине их называют талломными, или слоевищными, растениями [1].

Зеленые водоросли - *Chlorophyta*. Этот тип, представители которого имеют хроматофоры зеленого цвета (содержащие, как и у высших растений и

приблизительно в такой же пропорции, хлорофилл, каротин и ксантофилл), отличается большим разнообразием. Здесь встречаются формы одноклеточные, колониальные, многоклеточные и неклеточные - весьма различного облика и строения. Клетки в большинстве случаев одеты оболочкой, в составе которой чаще преобладает целлюлоза. Хроматофоры часто с пиреноидами. Продукт ассимиляции - главным образом, крахмал, иногда - липиды. Зооспоры со жгутиками равной длины, обычно в числе 2 - 4. Среди одноклеточных и колониальных форм есть, наряду с неподвижными, подвижные в вегетативном состоянии, обладающие жгутиками. Среди многоклеточных преобладает структура неветвящейся или ветвящейся нити. Половой процесс широко распространен и разнообразен, но у части видов отсутствует. Некоторые зеленые водоросли имеют правильную смену половой и бесполой форм развития [1].

Рассмотрим клетку Chlorella vulgaris (рисунок 1). Chlorella vulgaris относится: к отделу - зеленые водоросли (Chlorophyta), классу - зеленые или равножгутиковые водоросли (Clorophyceae, Isocontae), порядок - лорококковые или протококковые (Chlorococcophyceae, Protococcophyceae), семейство - ооцистовые (Oocystaceae), род - хлорелла (Chlorella). Chlorella vulgaris не требовательна к условиям обитания и способна весьма интенсивно размножаться, поэтому очень широко распространена и встречается практически повсеместно. Клетки хлореллы одиночные, имеют шаровидную или эллипсоидальную форму, диаметр не превышает 12 мкм. Этот неподвижный микроорганизм имеет тонкую гладкую целлюлозную оболочку. В клетке находится одно ядро и только один хлоропласт, расположенный пристеночно. В цитоплазме запасаются такие продукты, как жиры и крахмал. Хлорелла, как и другие зеленые водоросли, способна синтезировать органические вещества в процессе фотосинтеза. Также у водорослей данной группы есть потребность в небольшом количестве минералов для размножения. Единственный способ размножения хлореллы - бесполое

размножение при помощи неподвижных спор (апланоспор), которые напоминают уменьшенную копию материнской клетки. Половой процесс не известен. Хлорелла, также как и хламидомонада, является модельным объектом в самых разных исследованиях [2].

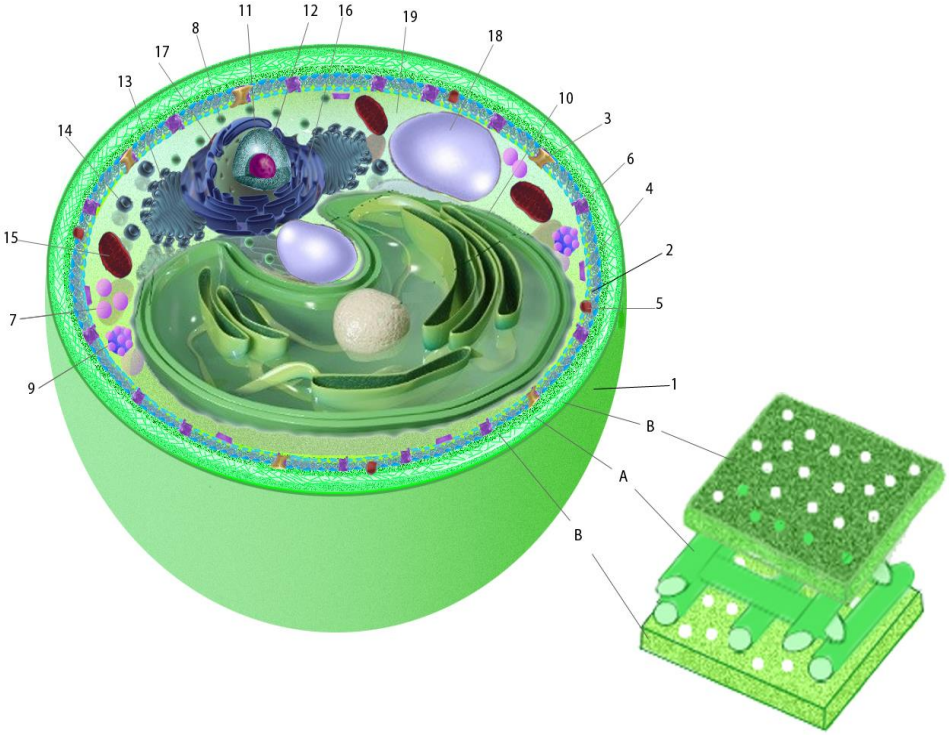

Рисунок 1 - Строение клетки микроводоросли *Chlorella vulgaris*:
1- Клеточная оболочка, А - Микрофибриллы, В - Пектиноподобные вещества (гемицеллюлоза, белки), 2 - Фосфолипидный бислой, 3 - Цельные трансмембранные белки, 4 - Периферические белки, 5 - Цельные белки, 6 - Цельные трансмембранные белки (ионный канал), 7 - Липидная капля, 8 - Рибосомы, 9 - Белково-липидные комплексы, 10 - Хлоропласт, 11 - Ядро, 12- Ядрышко, 13 - аппарат Гольджи, 14 - Лизосомы, 15 - Митохондрии, 16 - Гладкий эндоплазматический ретикулум, 17 - Шероховатый эндоплазматический ретикулум, 18 - Вакуоль, 19 – Цитоплазма

Клетка существенно не отличается от типичных клеток высших растений, однако есть свои особенности. Клетки водоросли имеют клеточную оболочку, состоящую из целлюлозы и пектиновых веществ. У многих из них

в состав клеточной стенки входят добавочные компоненты: известь, железо, альгиновая кислота и др. (таблица 1)

Таблица 1 - Состав клеточной стенки микроводорослей *Chlorella vulgaris* [3]

Толщина, нм	Состав	Преобладающие химические связи между мономерами	Энергия связей, кДж/моль
20-40	1. Вода 2. Жесткие компоненты мембраны – микрофибриллы - состоят из хитиноподобного гликана (поли-β-1,4 -D-N-ацетилглюкозоамин), микрофибриллы сшиты водородными связями. 3. Матрикс состоит из сложных полисахаридов мономеры: уроновая кислота, рамноза, арабиноза, ксилоза, фукоза, манноза, галактоза, глюкоза, содержится гемицеллюлоза, присутствуют пектиноподобные вещества, белки.	Водородные, ковалентные полярные	Ковалентная 40-700 Водородная 6-28

У микроводорослей стенка дочерних клеток образуется уже во время деления родительской. Впоследствии она называется первичной. У многих клеток позже образуется вторичная оболочка. Первичная клеточная оболочка состоит из микрофибрилл целлюлозы, погруженных в матрикс из других полисахаридов. Отличительной особенностью волокон целлюлозы является их прочность. Молекула целлюлозы представляет собой длинную

полисахаридную цепь. Отдельные молекулы соединяются друг с другом водородными связями в пучок, который называется микрофибриллой. Такие фибриллы образуют каркас клеточной стенки [4].

Матрикс клеточной стенки составляют полисахариды пектины и гемицеллюлозы, а также ряд других веществ (например, белков). Пектиновые вещества представляют собой группу кислых полисахаридов, их молекулы могут быть не только линейными, но и разветвленными. Гемицеллюлозы также смешанная группа полисахаридов. Длина их линейных молекул короче, чем у целлюлозы. Оболочки соседних клеток растений соединены между собой срединной пластинкой, состоящих из пектатов магния и кальция, для которых характерна клейкость (рисунок 2) [4].

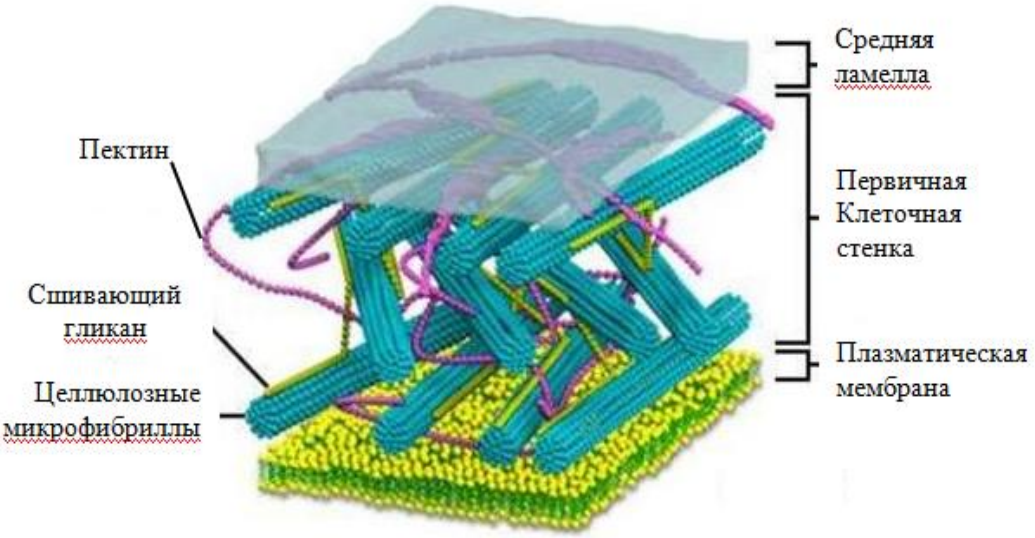

Рисунок 2 - Строение клеточной стенки микроводоросли *Chlorella vulgaris*

В состав стенок растений входит вода (составляет более половины массы), обуславливая ряд физических и химических свойств полисахаридов.

Оболочки разных клеток совместно обеспечивают всему растению и его отдельным частям механическую прочность и опору. Это функция клеточной стенки аналогична одной из функций скелета животных. Однако она не единственная [4].

Жесткость стенок препятствует растяжению клеток и их разрыву. В результате по физическим законам в клетки может путем осмоса поступать вода (таблица 2).

Таблица 2 - Состав плазматической мембраны микроводоросли *Chlorella vulgaris* [3]

Толщина, нм	Состав	Преобладающие химические связи между мономерами	Энергия связей, кДж/моль
6-10	Фосфолипиды, эргостерол, гликолипиды, белки-переносчики, гликопротеины	Гидрофобные взаимодействия, водородные связи	Ковалентная 40-700 Водородная 6-28 Гидрофобные 1-4

Все биомембраны построены одинаково; они состоят из двух слоев липидных молекул толщиной около 6 нм, в которые встроены белки. Некоторые мембраны содержат, кроме того, углеводы, связанные с липидами и белками. Соотношение липиды: белки: углеводы является характерным для клетки или мембраны и существенно варьирует в зависимости от типа клеток или мембран [4].

Компоненты мембран удерживаются нековалентными связями, вследствие чего они обладают лишь относительной подвижностью, т. е. могут диффундировать в пределах липидного бислоя. Текучесть мембран зависит от липидного состава и температуры окружающей среды. С увеличением содержания ненасыщенных жирных кислот текучесть возрастает, так как наличие двойных связей способствует нарушению полукристаллической мембранной структуры. Подвижными являются и мембранные белки. Если белки не закреплены в мембране, они «плавают» в липидном бислое как в жидкости. Поэтому говорят, что биомембраны имеют жидкостно-мозаичную структуру [4].

В то время как «дрейф» в плоскости мембраны происходит достаточно легко, переход белков с внешней стороны мембраны на внутреннюю («флип-флоп») невозможен, а переход липидов происходит крайне редко. Для «перескока» липидов необходимы специальные белки транслокаторы. Исключение составляет холестерин, который может легко переходить с одной стороны мембраны на другую (рисунок 3).

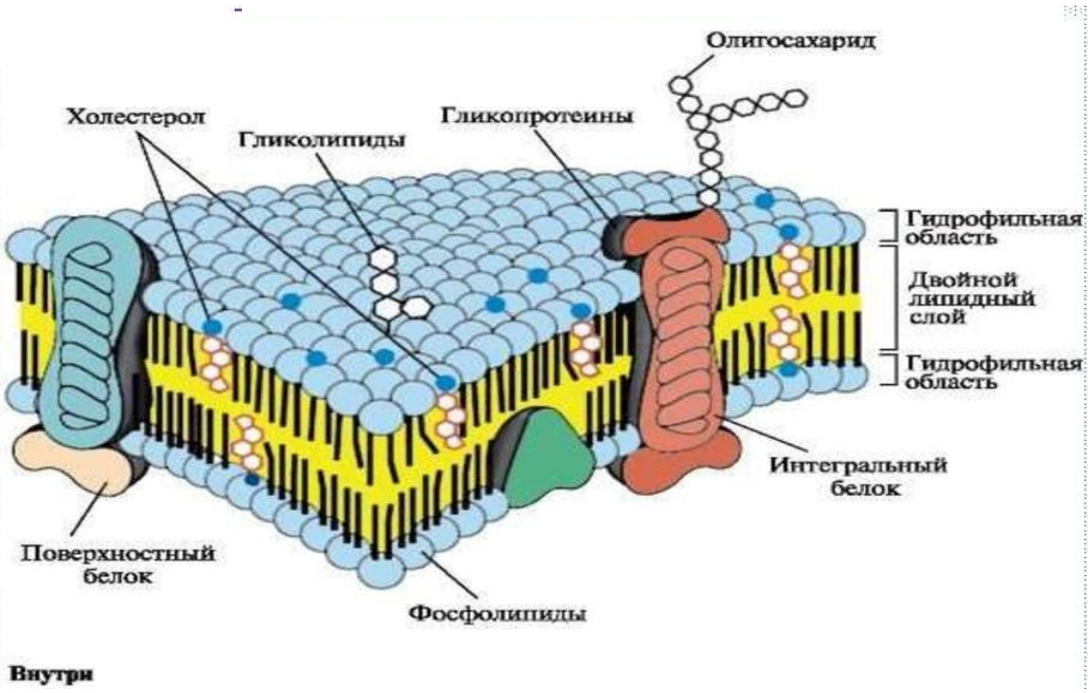

Рисунок 3 - Структура плазматической мембраны

На рисунке 3 схематически изображена биомембрана. В мембранах содержатся липиды трех классов: фосфолипиды, холестерин и гликолипиды. Наиболее важная группа, фосфолипиды, включает фосфатидилхолин (лецитин), фосфатидилэтаноламин, фосфатидилсерин, фосфатидилинозит и сфингомиелин. Холестерин присутствует во внутриклеточных мембранах животных клеток (за исключением внутренней мембраны митохондрий). Гликолипиды входят в состав многих мембран (например, во внешний слой плазматических мембран). В состав гликолипидов входят углеводные функциональные группы, которые ориентируются в водную фазу.

Липиды мембран представляют собой амфифильные молекулы с полярной гидрофильной головкой (голубого цвета) и неполярным липофильным хвостом (желтого цвета). В водной среде они агрегируют за счет гидрофобных взаимодействий и вандерваальсовых сил (рисунок 4) [4].

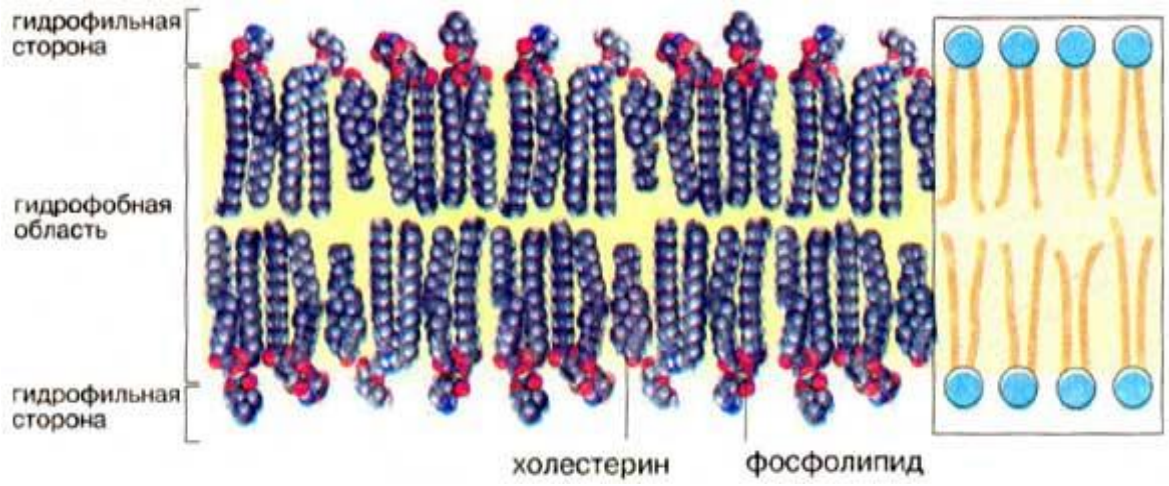

Рисунок 4 - Мембранные липиды

К мембранным белкам относятся белки, которые встроены в клеточную мембрану или мембрану клеточной органеллы или ассоциированы с таковой. Около 25 % всех белков являются мембранными. Мембранные белки могут быть классифицированы по топологическому или биохимическому принципу. Топологическая классификация основана на том, сколько раз белок пересекает липидный бислой. В соответствии с этим критерием белки подразделяются на монотопические, битопические и политопические:

- монотопические белки взаимодействуют с одной поверхностью мембраны и не пересекают её;

- битопические пронизывают мембрану насквозь и взаимодействуют с обеими её поверхностями;

- политопические пронизывают мембрану несколько раз (многократное взаимодействие с липидами).

Понятно, что первые относятся к периферическим белкам, а вторые и третьи к интегральным (рисунок 5).

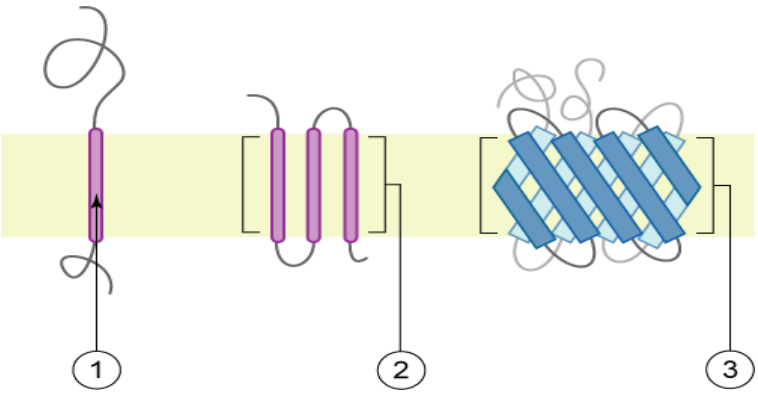

Рисунок 5 - Мембранные белки:

Различные категории политопических белков. Связывание с мембраной за счёт (1) единичной трансмембранной альфа-спирали, (2) множественных трансмембранных альфа-спиралей, (3) бета-складчатой структуры

По отношению к мембране мембранные белки делятся на поли- и монотопические. Политопические, или трансмембранные, белки полностью пронизывают мембрану и, таким образом, взаимодействуют с обеими сторонами липидного бислоя. Как правило, трансмембранный фрагмент белка является альфа-спиралью, состоящей из гидрофобных аминокислот (возможно от 1 до 20 таких фрагментов). Только у бактерий, а также в митохондриях и хлоропластах трансмембранные фрагменты могут быть организованы как бета-складчатая структура (от 8 до 22 поворотов полипептидной цепи). Интегральные монотопические белки постоянно встроены в липидный бислой, но соединены с мембраной только на одной стороне, не проникая на противоположную сторону (рисунок 6).

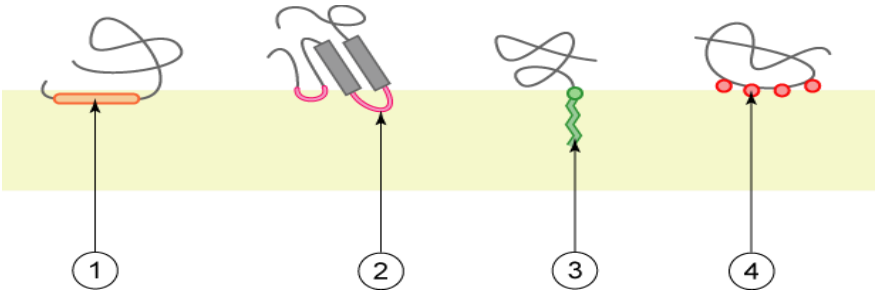

Рисунок 6 - Различные категории интегральных монотопических белков

Данные белки связаны с мембраной за счёт (1) амфипатической альфа-спирали, параллельной плоскости мембраны, (2) гидрофобной петли, (3) ковалентно соединённого жирнокислотного остатка, (4) электростатического взаимодействия (прямого или кальций-опосредованного).

По биохимической классификации мембранные белки делятся на интегральные и периферические. Интегральные мембранные белки прочно встроены в мембрану и могут быть извлечены из липидного окружения только с помощью детергентов или неполярных растворителей. По отношению к липидному бислою интегральные белки могут быть трансмембранными политопическими или интегральными монотопическими. Периферические мембранные белки являются монотопическими белками. Они либо связаны слабыми связями с липидной мембраной, либо ассоциируют с интегральными белками за счёт гидрофобных, электростатических или других нековалентных сил. Таким образом, в отличие от интегральных белков они диссоциируют от мембраны при обработке соответствующим водным раствором (например, с низким или высоким pH, с высокой концентрацией соли или под действием хаотропного агента). Эта диссоциация не требует разрушения мембраны[4].

Цитоплазма у большинства водорослей расположена тонким слоем вдоль клеточной стенки и окружает большую центральную вакуоль. В цитоплазме хорошо различимы эндоплазматический ретикулум (При участии эндоплазматического ретикулума происходит трансляция и транспорт белков, синтез и транспорт липидов и стероидов. Для ЭПР характерно также накопление продуктов синтеза. Эндоплазматический ретикулум принимает участие в том числе и в создании новой ядерной оболочки), митохондрии (играют роль энергетических станций клеток, в них протекают процессы окислительного фосфорилирования, ферментативного окисления различных веществ с последующим накоплением энергии в виде молекул аденозинтрифосфата - АТФ; хранят наследственный материал в виде митохондриальной ДНК, митохондрии для своей работы нуждаются в белках,

закодированных в генах ядерной ДНК, так как собственная митохондриальная ДНК может обеспечить митохондрии лишь несколькими белками), аппарат Гольджи (накопление белков, липидов, углеводов, модификация поступивших органических веществ, «упаковка» в мембранные пузырьки белков, липидов, углеводов, секреция белков, липидов, углеводов, синтез углеводов и липидов), рибосомы, одно или несколько ядер [5].

В клетках водорослей из органелл особенно заметны хроматофоры (хлоропласты), которые в отличие от хлоропластов высших растений более разнообразны по форме, размерам, числу, строению, местоположению и набору пигментов. Они могут быть чашевидными, лентовидными, пластинчатыми, звездчатыми, дисковидными и др.

В хроматофорах сосредоточены фотосинтезирующие пигменты:

- хлорофиллы a, b, c, d, каротиноиды (каротины и ксантофиллы),
- фикобилины (фикоцианин, фикоэритрин).

Кроме того, в матриксе хроматофора находятся рибосомы, ДНК, липидные гранулы и особые включения - пиреноиды. Пиреноиды присущи почти всем водорослям и небольшой группе мхов. Они являются не только местом скопления запасных питательных веществ, но и зоной их синтеза [5].

Веществами запаса у водорослей служат крахмал, липиды, гликоген, волютин, водорастворимый полисахарид ламинарии и др. [5]

Применение *Chlorella vulgaris* основано на высоком содержании в ней биологически ценных веществ. На долю витаминов в биомассе *Chlorella vulgaris* приходятся витамины групп B, C, PP, E, каротин. В диких штаммах в нативном виде содержатся микроэлементы - йод, бром,мышьяк, кобальт, калий, фосфор, железо, магний и тому подобные и антибиотики [5].

Использованные источники:

1. Volimo.ru. - Строение клетки водорослей. - [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://volimo.ru/books/item/f00/s00/z0000021/st004.shtml (дата обращения 23.02.2021)

2. Volimo.ru. - Водоросли. Справочник. - [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://volimo.ru/books/item/f00/s00/z0000018/index.shtml (дата обращения 23.02.2021)

3. Темнов, М.С. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процессов получения эфиров жирных кислот [Текст] : дис. канд. биотех. наук : 05.17.08 / М.С. Темнов. - М., 2017. - 223 с.

4. Biology.su. - Клеточная стенка .- [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://biology.su/cytology/cell-wall (дата обращения 23.02.2021).

5. Sbio.info.- Общая характеристика водорослей.- [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://sbio.info/materials/orgbiol/orgrastnizsh/orgvodorosl/76 (дата обращения 23.02.2021).