

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ / PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37>

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ФОТОСИНТЕЗА ШТАММА МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA VULGARIS BIN* В УСЛОВИЯХ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОПУЛЯЦИИ И ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННОЙ СУСПЕНЗИИ В ОРГАНИЧЕСКОМ КАРТОФЕЛЕВОДСТВЕ

Научная статья

Чмудев И.С.<sup>1,\*</sup>, Тищенко Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Магаданский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Магадан, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (chmulev01.08.89[at]mail.ru)

**Аннотация**

В публикации приводятся результаты исследования о влиянии управления возрастной структуры популяции на повышение фотосинтеза штамма микроводоросли *Chlorella Vulgaris BIN* в условиях Магаданской области. Разработанный способ повышения фотосинтеза дает возможность получать суспензию хлореллы при минимальных затратах электроэнергии. Также представлены данные рекогносцировочного опыта с использованием полученной суспензии для оценки возможности внедрения в органическое картофелеводство в природно-климатических условиях Магаданской области. Суспензия хлореллы испытана на раннеспелом сортообразце картофеля Сеянец 15/562. Полученные предварительные данные говорят о том, что применение суспензии хлореллы на картофеле способствовали ускорению сроков прохождения фенотипов в среднем на 2-3 дня по сравнению с контрольным вариантом.

**Ключевые слова:** фотосинтез, микроводоросли, *chlorella vulgaris bin*, возрастная структура популяции, органическое картофелеводство.

DEVELOPMENT OF A METHOD TO INCREASE THE PHOTOSYNTHESIS OF *CHLORELLA VULGARIS BIN* VARIANT IN THE MAGADAN OBLAST BY CONTROLLING THE AGE STRUCTURE OF THE POPULATION AND STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING THE RESULTING SUSPENSION IN ORGANIC POTATO FARMING

Research article

Chmulev I.S.<sup>1,\*</sup>, Tishchenko G.V.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Magadan Research Institute of Agriculture, Magadan, Russian Federation

\* Corresponding author (chmulev01.08.89[at]mail.ru)

**Abstract**

The publication presents the results of a study on the effect of controlling the age structure of the population on increasing the photosynthesis of microalgae *Chlorella Vulgaris BIN* variant in the Magadan Oblast. The developed method of increasing photosynthesis makes it possible to obtain a suspension of *chlorella* with minimal energy consumption. The data of the reconnaissance experiment with the use of the suspension obtained to assess the possibility of introducing it into organic potato farming in the natural climatic conditions of the Magadan Oblast are also presented. *Chlorella* suspension was tested on early maturing potato variety of Seedling 15/562. The preliminary data obtained indicate that the application of *chlorella* suspension on potatoes contributed to accelerating the timing of phenophases by 2-3 days on average compared with the control variant.

**Keywords:** photosynthesis, microalgae, *chlorella vulgaris bin*, age structure of population, organic potato farming.

**Введение**

С каждым годом роль органического земледелия в мире возрастает. Для нашей страны такое направление ведения сельского хозяйства довольно новое. Регламентируется оно Федеральным законом «Об органической продукции...» [1]. В данном законодательном акте отражены основные понятия, правила и требования необходимые для производства органической продукции.

В целом в органическом растениеводстве они сводятся к запрету на применение синтетических агрохимикатов и пестицидов за исключением тех, которые разрешены к использованию в соответствии с российскими и другими стандартами в сфере производства органической продукции, например – ГОСТ 33980-2016 «Продукция органического производства. Правила производства, переработки, маркировки и реализации» [2].

Одним из методов ведения органического земледелия является использование суспензии микроводоросли *Chlorella Vulgaris BIN* [3] в сельскохозяйственном производстве. Этот метод хорошо зарекомендовал себя в центральных регионах страны [4], но совершенно не изучен в районах Севера Дальнего Востока.

Важнейшим фактором, регламентирующим получение данной микроводоросли является световая энергия необходимая ей для фотосинтеза [5].

Существенные колебания в продолжительности светового дня по сезонам года, частые туманы в прибрежной, основной земледельческой зоне Магаданской области не позволяют выращивать микроводоросли с использованием только солнечной энергии для энергетического обеспечения биосинтеза. Поэтому наиболее оптимальным здесь является выращивание хлореллы при помощи искусственного освещения.

В данном случае критерием совершенства как способов, так и устройств для производства хлореллы, должен быть прежде всего минимум затрат электроэнергии составляющей, как известно, основной вес в структуре себестоимости биомассы, получаемой в установках с искусственными источниками света. В связи с этим в Магаданском научно-исследовательском институте сельского хозяйства был разработан способ повышения эффективности фотосинтеза микроводоросли *Chlorella Vulgaris* BIN для снижения и более эффективного использования электроэнергии при освещении микроводоросли в фотобиореакторе.

Впервые в условиях Севера Дальнего Востока полученная суспензия была применена в рекогносцировочном опыте на раннеспелом сортообразце картофеля Сеянец 15/562. Целью исследования стали возможности её использования в органическом картофелеводстве.

#### Методы и принципы исследования

Известные в настоящее время способы выращивания микроводорослей с использованием фотобиореакторов предполагают управление химическим составом культуральной жидкости (хемотрат) или оптической плотностью культуры (турбидостат). Вместе с тем, известно [6], что любая функциональная характеристика популяции определяется соотношением:

$$F = N \int_0^T f(\tau) \cdot n(\tau) d\tau, 0 \leq \tau \leq T \quad (1)$$

где:  $f$  – исследуемая характеристика популяции,

$\tau$  – переменная, обозначающая возраст клетки,

$f(\tau)$  – функция, описывающая изменение данной характеристики по жизненному циклу клетки,

$n(\tau)$  – относительное возрастное распределение численности клеток в популяции.

Т.е. величина функциональной характеристики в установившемся состоянии проточного культивирования зависит от  $n(\tau)$ , а значит воздействие на  $n(\tau)$  извне позволит управлять величиной, например, фотосинтеза. Вполне понятно, что разработка такого управления должна производиться с учетом возможностей его практической осуществимости. Из рисунка 1 видно, что клетки стадии  $T_{(c)} - T$  практически не отличаются друг от друга по величине, а значит при использовании для разделения клеток по возрастам, например, поля центробежных сил [7], воздействие на возрастную структуру популяции можно осуществить в диапазоне не меньше, чем  $T_{(c)} - T$ .

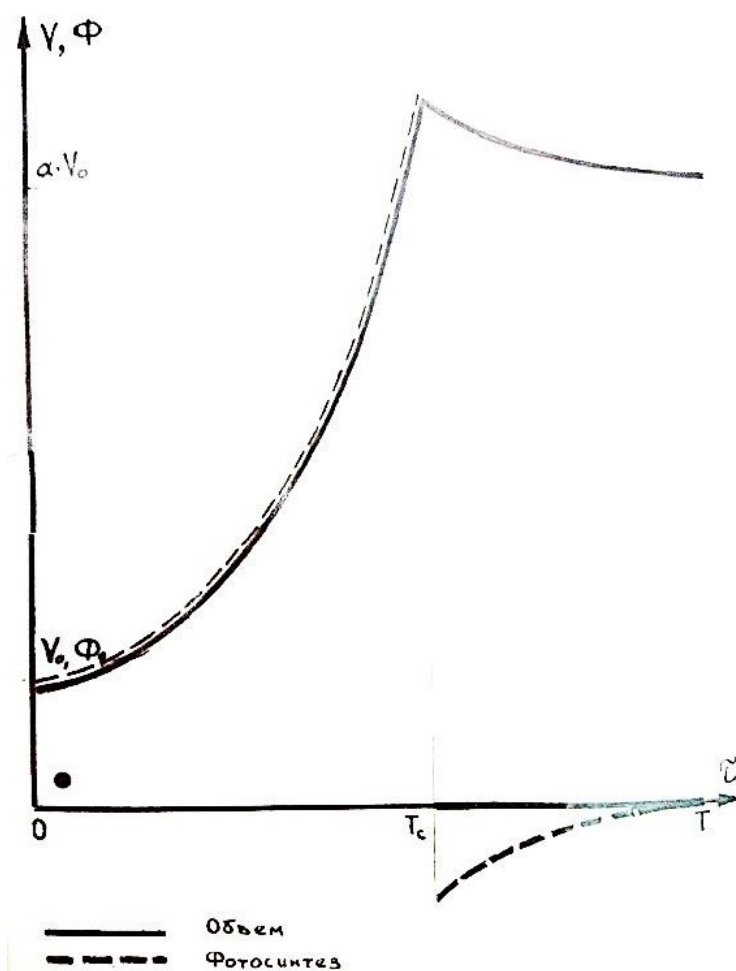


Рисунок 1 - Величина фотосинтеза и объем клетки хлореллы в онтогенезе

Представим, что нам удалось каким-то образом распознавать и выводить из популяции только клетки возраста  $T$  (см. рисунок 1), обладающие, как известно, способностью делиться на автоспор. Тогда, поддерживая в каждый момент времени постоянным их количество, будем иметь следующую картину распределения численности клеток по возрастам [8] (см. рисунок 2):

$$N_{\tau} = N_0, 0 \leq \tau \leq T \quad (2)$$

$$N_{\tau} = \frac{N_0}{a} = N_T, \tau = T \quad (3)$$

где:  $N_{\tau}$  – число клеток возраста  $\tau$ ,

$T$  – значение возраста, соответствующее концу жизненного цикла,

$N_T$  – количество делящихся в каждый момент клеток.

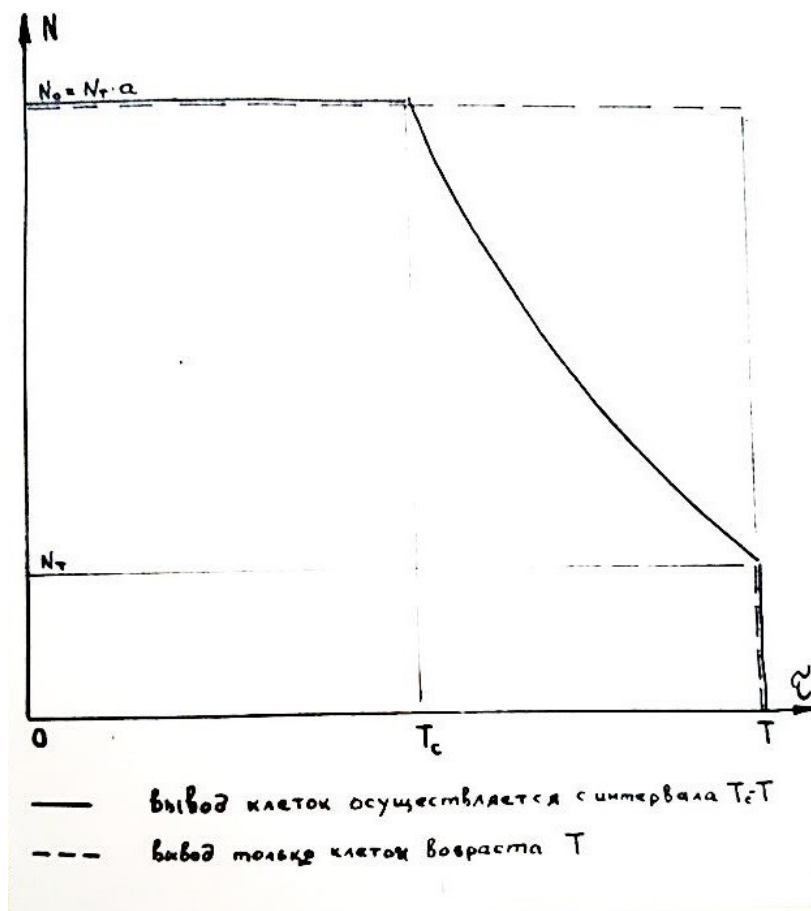


Рисунок 2 - Возрастное распределение численности клеток

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37.2>

Это означает, что мгновенная скорость изменения числа клеток каждого возраста равна нулю:

$$\frac{dN_{\tau}}{d\tau} = 0, 0 \leq \tau < T, \tau \neq T \quad (4)$$

Будем теперь в каждый момент времени выводить одну и ту же часть  $\chi$  клеток каждого возраста, например, с интервала (выбор интервала сделан по условию осуществимости). Тогда число клеток каждого возраста в этом интервале в каждый момент времени будет уменьшаться, что может быть записано:

$$\frac{dN_{\tau}}{d\tau} = -\chi \cdot N_{\tau} \quad (5)$$

Т.к. мера измерения какой – либо величины в каждый момент времени – суть величина мгновенной скорости. Интегрируя формулу 4 от  $N_0$  до  $N_T$ , получим:

$$N_{\tau} = N_0 \cdot e^{-\chi t}, 0 \leq t \leq T - T_c \quad (6)$$

Из формулы 6 видно, что число клеток каждого возраста из интервала  $T_{(c)} - T$  уменьшается по экспоненте. Очевидно, что при соответствующем выборе  $\lambda$  нам не придется думать о способе поддержания числа делящихся клеток на уровне:  $N_T = \frac{N_0}{a}$ .

Для нахождения такого значения  $\lambda$  достаточно проинтегрировать формулу 4 в пределах от  $N_0$  до  $N_T = N_0 \cdot e^{\mu T}$ . Тогда получим:

$$e_n \frac{N_0 \cdot e^{-\mu T}}{N_0} = x(T - T_c) \tag{7}$$

Откуда:

$$X = \frac{\mu \cdot T}{T - T_c} \tag{8}$$

Тогда:

$$N_\tau = N_0 \cdot e^{\frac{\mu \cdot T}{T - T_c} \cdot t}, 0 \leq t \leq T - T_c \tag{9}$$

Или:

$$N_\tau = N_0 \cdot e^{\frac{\mu \cdot T}{T - T_c} (\varepsilon - T_c)}, T_c \leq \varepsilon \leq T \tag{10}$$

Таким образом, выводим из культиватора лишь клетки, находящиеся на возрастном интервале  $T - T_c$ , мы обеспечиваем поддержание процесса и имеем следующее распределение численности клеток в культиваторе в зависимости от их возраста:

$$\begin{cases} N_\tau = N_0, 0 \leq \tau \leq T_c \\ N_\tau = N_0 \cdot e^{\frac{\mu \cdot T}{T - T_c} (\varepsilon - T_c)}, T_c \leq \tau \leq T \end{cases} \tag{11}$$

Нормируя последнее число по числу клеток, получим соотношение для относительного возрастного распределения:

$$\begin{cases} n_\tau = \frac{\mu T}{T \cdot T_c \cdot \mu + (T - T_c)(1 - e^{-\mu T})}, 0 \leq \tau \leq T_c \\ n_\tau = \frac{\mu T \cdot e^{\frac{\mu T}{T - T_c} (\tau - T_c)}}{T \cdot T_c \cdot \mu + (T - T_c)(1 - e^{-\mu T})}, T_c \leq \tau \leq T \end{cases} \tag{12}$$

Тогда с учетом соотношений для величины фотосинтеза клетки хлореллы в онтогенезе:

$$\begin{cases} \Phi_{(\tau)} = \Phi_0 \cdot e^{\mu \frac{T}{T_c} \cdot \tau}, 0 \leq \tau \leq T_c \\ \Phi_{(\tau)} = 0, T_c \leq \tau \leq T \end{cases} \tag{13}$$

где:  $\Phi_0$  – величина фотосинтеза автоспоры,

Получим:

$$\Phi_{II} = \frac{N \cdot \Phi_0 \cdot \mu \cdot T}{T \cdot T_c \cdot \mu + (T - T_c)(1 - e^{-\mu T})} \int_0^{T_c} e^{\frac{\mu T}{T_c} \tau} d\tau = \frac{N \cdot \Phi_0 \cdot T_c (e^{\mu T} - 1)}{T \cdot T_c \cdot \mu + (T - T_c)(1 - e^{-\mu T})} \tag{14}$$

Осуществимость подобного воздействия на возрастную структуру популяции не вызывает сомнений и реализована в лаборатории ФГБНУ Магаданского НИИСХ.

Способ влияния на возрастную структуру популяции был применен для получения опытного объема суспензии хлореллы которая была применена для исследования влияния на раннеспелый сорт картофеля Сеянец 15/562. Исследования проводились на базе ФГБНУ Магаданский НИИСХ. Опыт заложен по следующей схеме (см. таблицу1):

Таблица 1 - Схема рекогносцировочного опыта с полученной суспензией хлореллы

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37.3>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
I повторность								II повторность								III повторность												
A		A		A		A			A		A		A		A			A		A		A		A		A		A
K		2		3		4			2		K		4		3			2		4		K		3				

Примечание: А – раннеспелый сорт Сеянец 15/562; К – Контроль без обработок; 2 – Обработка почвы суспензией хлореллы в борозды при посадке, 1 л/м кв.; 3 – Обработка клубней перед посадкой, замачивание в суспензии хлореллы в течение 30 мин.; 4 – Двукратная обработка вегетирующих растений, 1 л/м кв.

Каждый вариант высаживался в двухрядковых делянках по 10 клубней в ряду. Между вариантами оставляли защитные полосы. Повторность трёхкратная. Суспензия вносилась в почву в борозды перед посадкой, клубни замачивались непосредственно перед посадкой. Обработка листовой поверхности двукратно, в фазу массовых всходов и до смыкания рядков. Схема посадки 30 x 70 см.[9].

Агротехника общепринятая для зоны. Минеральные удобрения вносились согласно принятым нормам N60P60K60 локально при посадке и в той же дозе в подкормку при культивации посадок.

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенных научных изысканий был разработан способ управления возрастной структурой популяции микроводорослей, разработанный научным сотрудником Магаданского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Этот способ соответствует современным представлениям об изменении величины фотосинтеза хлореллы в онтогенезе. Отличительной особенностью решения является то, что с целью повешения эффективности процесса, суспензию после вывода из культиватора разделяют одним из известных способов (седиментацией, центрифугированием) на содержащую крупные, физиологически неактивные клетки, которые выводят в качестве продукта, и суспензию активных клеток, которую возвращают на стадию культивирования.

Способ разделения седиментацией основан на изменении рН суспензии с использованием едкого калия. Центрифугирование подразумевает использование бытовой или промышленной центрифуги в зависимости от объема фотобиореактора.

Рассчитаем для сравнения с известными [10] величину фотосинтеза хлореллы планктонного штамма *Chlorella vulgaris* BIN, при реализации предлагаемого способа культивирования.

Заметим, что в соотношениях для этого способа культивирования и не будут равны, так как проток для планктонного штамма приводит к уменьшению удельной скорости роста (см. таблицу 2).

Таблица 2 - Величина фотосинтеза хлореллы при реализации нового способа культивирования

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37.4>

(коэффициент удельного размножения)	0,100	0,200	0,300	0,400
	2,788	4,743	9,497	20,975
Эффективность способа, в %	111	132	182	280

Примечание: штамм *Chlorella vulgaris* BIN

Экспериментальная проверка способа была выполнена на опытно-экспериментальной установке построенной в Магаданском научно-исследовательском институте сельского хозяйства, при этом были получены следующие результаты (см. таблицу 3).

Таблица 3 - Экспериментальная проверка эффективности нового способа

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37.5>

Сутки опыта	Контроль		Опыт		Эффект в %	
	Скорость процесса, г/час	Выход продукта, г/л	Скорость процесса, г/час	Выход продукта, г/л	Скорость процесса	Выход продукта
1	3,17	0,76	6,03	1,45	190,2	190,8
2	3,25	0,78	5,95	1,43	183,1	183,3

Примечание: штамм *Chlorella vulgaris* BIN

Из таблицы 3 видно, что управление возрастной структурой популяции позволяет в несколько раз повысить эффективность фотосинтеза микроводорослей при тех же энергетических затратах.

Предварительные опытные данные практического применения суспензии хлореллы показали положительную динамику в сроках прохождения фенофаз. Обработка клубней и почвы перед посадкой суспензией хлореллы ускорило появление всходов на семь дней, но привела к задержке массовой бутонизации на 3 дня по сравнению с контролем. В

это же время обработка ботвы способствовала ускорению наступления фазы бутонизации на 4 дня. Обработка клубней и почвы, как видно из таблицы 4 замедлила сроки прохождения фенофаз бутонизации и цветения на 2-3 дня.

Таблица 4 - Сроки прохождения фенофаз  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.123.37.6>

Вариант	Всходы			
	Начало	Массовые	Количество дней от посадки до массовых всходов	Отклонения от контроля (+, -)
Контроль	29.06	11.07	40	0
Обработка почвы	24.06	04.07	33	-7
Обработка клубней	24.06	04.07	33	-7
Обработка ботвы	29.06	11.07	40	0
Бутонизация				
	Начало	Массовая	Количество дней от массовых всходов до массовой бутонизации	Отклонения от контроля (+, -)
Контроль	25.07	29.07	18	0
Обработка почвы	18.07	25.07	21	+3
Обработка клубней	18.07	25.07	21	+3
Обработка ботвы	18.07	29.07	14	-4
Цветение				
	Начало	Массовое	Количество дней от массовой бутонизации до массового цветения	Отклонения от контроля (+, -)
Контроль	03.08	05.08	7	0
Обработка почвы	29.07	03.08	9	+2
Обработка клубней	29.07	03.08	9	+2
Обработка ботвы	03.08	05.08	7	0

Примечание: посадка 01.06

### Заключение

Для повышения эффективности фотосинтеза микроводоросли *Chlorella Vulgaris* BIN в условиях Магаданской области на установки не проточного типа, применимо решение при котором суспензию разделяют седиментацией или центрифугированием на содержащую крупные, физиологически неактивные клетки, которые выводят в качестве продукта, и суспензию активных клеток, которую возвращают на стадию культивирования. Таким образом, реализуется способ повышения фотосинтеза за счет управления возрастной структурой популяции.

Применение суспензии хлореллы на картофеле способствует более раннему появлению всходов, но несущественно замедляет наступление фаз бутонизации и цветения за исключением варианта с обработкой ботвы.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Российская Федерация. Законы. Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон : [от 03.08.2018 № 280-ФЗ]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304017/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304017/) (дата обращения: 24.07.2022).
2. ГОСТ 33980-2016 Продукция органического производства. Правила производства, переработки, маркировки и реализации (с поправкой). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200141713>. (дата обращения: 24.07.2022).
3. Богданов Н.И. Штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* BIN для получения биомассы и очистки сточных вод : патент Рос. Федерации № 2192459 / Н.И. Богданов ; Бюл. № 31. – 2002.
4. Лукьянов В.А. Роль микроводорослей в растениеводстве / В.А. Лукьянов, А.И. Стифеев // Экологическая безопасность региона : материалы V Международной научно-практической конференции. – Брянск : Изд-во РИО БГУ, 2012. – С. 219-222.
5. Степанова А.М. Влияние светового фактора на рост и фотосинтез хлореллы / А.М. Степанова // Вестник ЛГУ. – 1963. – 72 с.
6. Цоглин Л.Н. Математическое моделирование и экспериментальное изучение процессов роста и автоселекции микроводорослей / Л.Н. Цоглин. – М, 1973. – 110 с.
7. Герасименко Л.М. Получение синхронной культуры *Chlorella vulgaris* / Л.М. Герасименко, М.А. Пушева // Микробиология. – 1968. – Т. 37. – Вып. 1. – С. 7-8.
8. Кантере В.И. К теории управления процессами культивирования микроорганизмов / В.И. Кантере, Ю.М. Крылов, И.А. Баснакьян и др. // Микробиологическая промышленность. – 1970. – Вып. 6. – С. 15-16.
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
10. Глаголева Т.А. Оценка фотосинтеза у *Chlorella vulgaris* / Т.А. Глаголева, О.В. Заленский // Фотосинтез и использование солнечной энергии. – 1971. – 283 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Rossijskaja Federacija. Zakony. Ob organicheskoj produkcii i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatel'nye акты Rossijskoj Federacii [On Organic Products and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation] : federal law : [dated 03.08.2018 No. 280-FL]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304017/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304017/) / (accessed: 07/24/2022). [in Russian]
2. GOST 33980-2016 Produkcija organičeskogo proizvodstva. Pravila proizvodstva, pererabotki, markirovki i realizacii (s popravkoj) [Organic products. Rules of production, processing, labeling and sale (as amended)]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200141713>. (accessed: 24.07.2022). [in Russian]
3. Bogdanov N.I. Shtamm mikrovodorosli *Chlorella vulgaris* BIN dlja poluchenija biomassy i ochistki stochnyh vod : patent Ros. Federacii № 2192459 [Strain of microalgae *Chlorella vulgaris* BIN for biomass production and wastewater treatment : patent Ros. Federation No. 2192459] / N.I. Bogdanov ; Byul. No. 31. – 2002. [in Russian]
4. Luk'janov V.A. Rol' mikrovodoroslej v rastenievodstve [The role of microalgae in crop production] / V.A. Luk'janov, A.I. Stifeev // Jekologičeskaja bezopasnost' regiona [Environmental safety of the region] : materials of the V International Scientific and Practical Conference. – Brjansk : Publishing House RIO BSU, 2012. – P. 219-222. [in Russian]
5. Stepanova A.M. Vlijanie svetovogo faktora na rost i fotosintez hlorellы [The influence of the light factor on the growth and photosynthesis of chlorella] / A.M. Stepanova // Vestnik LGU [Bulletin of LSU]. – 1963. – 72 p. [in Russian]
6. Tsoglin L.N. Matematičeskoe modelirovanie i jeksperimental'noe izučenie processov rosta i avtoselekcii mikrovodoroslej [Mathematical modeling and experimental study of microalgae growth and autoselection processes] / L.N. Tsoglin. – M, 1973. – 110 p. [in Russian]
7. Gerasimenko L.M. Poluchenie sinhronnoj kul'tury *Chlorella vulgaris* [Obtaining synchronous culture of *Chlorella vulgaris*] / L.M. Gerasimenko, M.A. Pusheva // Mikrobiologija [Microbiology]. – 1968. – Vol. 37. – Iss. 1. – P. 7-8. [in Russian]
8. Kantere V.I. K teorii upravlenija processami kul'tivirovanija mikroorganizmov [To the theory of control of the processes of cultivation of microorganisms] / V.I. Kantere, Ju.M. Krylov, I.A. Basnak'jan et. al. // Mikrobiologičeskaja promyšlennost' [Microbiological industry]. – 1970. – Iss. 6. – P. 15-16. [in Russian]
9. Dosphehov B.A. Metodika polevogo opyta [Methodology of field experience] / B.A. Dosphehov. – M. : Agropromizdat, 1985. – 351 p. [in Russian]
10. Glagoleva T.A. Ocenka fotosinteza u *Chlorella vulgaris* [Assessment of photosynthesis in *Chlorella vulgaris*] / T.A. Glagoleva, O.V. Zalenskij // Fotosintez i ispol'zovanie solnečnoj jenerгии [Photosynthesis and the use of solar energy]. – 1971. – 283 p. [in Russian]