УДК: 582.52/59

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА БЕЛКА В РЯСКЕ *LEMNA MINOR*

И.Ю. Сергеева[1,*], А.А. Аль Кассаб[2]

[1]*ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47*

[2]*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30*

**e-mail: sergeeva.76@list.ru*

Дата поступления в редакцию: 17.07.2017
Дата принятия в печать: 04.09.2017

Аннотация. В настоящее время применение ряски рассматривается как дешевый и эффективный способ очистки сточных вод, полученных из биореакторов сельскохозяйственных ферм. В дополнение к экологическим преимуществам продуктивная биомасса ряски, произведенная во время очистки сточных вод, содержит высокое содержание питательных веществ, особенно протеина, что позиционирует ее как дополнительный ингредиент рациона сельскохозяйственных животных, птицы и рыб. В работе изучено влияние условий культивирования ряски *Lemna minor* на синтез белка с учетом варьирования концентрации питательных веществ в сточных водах. Для исследований применялась система культивирования, объединяющая анаэробный биореактор и собственно систему выращивания ряски. Определена удельная скорость роста ряски, которая составила 2,68; 3,85 и 4,61 г/(м^2·сут) соответственно концентрации субстрата 20, 40 и 60 %. Максимальная плотность роста была достигнута (в г/м^2): 67,4 – для 20 % субстрата на 30-е сутки; 63,0 – для 40 % субстрата и 66,0 – для 60 % субстрата на 27-е сутки культивирования. Изучена динамика содержания общего азота по Кьельдалю в ряске. Наибольшее содержание общего азота в ряске, выращенной на питательной среде с 20 % концентрацией субстрата, наблюдалось на 15-е сутки с максимальной скоростью накопления 0,16 г/м²/сутки. На 21-е сутки культивирования в субстрате с 40%-ой концентрацией был зафиксирован максимум общего азота при скорости накопления 0,20 г/м²/сутки; с 60%-ным содержанием сточных вод – при скорости 0,24 г/м²/сутки. Изучена динамика синтеза белка в ряске. В ходе эксперимента установлено, что на 16-е сутки культивирования был отмечен максимальный процент содержания белка в ряске для 20%-ного субстрата – 27,62 %, в то время как в 40%-ном – 28,13 % и в 60%-ном – 29,14 % – на 19-е сутки выращивания. По итогам исследований рассчитана математическая модель, которая может считаться адекватной и быть использована для прогнозирования содержания белка в ряске вида *Lemna minor* в зависимости от концентрации питательных веществ в субстрате и продолжительности культивирования.

Ключевые слова. Ряска, *Lemnaceae, Lemna minor,* культивирование, общий азот, белок, моделирование

MODELING THE PROCESS OF PROTEIN SYNTHESIS IN THE DUCKWEED *LEMNA MINOR*

I.Yu. Sergeeva[1,*], A.A. Al Kassab[2]

[1]*Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia*

[2]*National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia*

**e-mail: sergeeva.76@list.ru*

Received: 17.07.2017
Accepted: 04.09.2017

Abstract. Currently, duckweed is considered to be a cheap and effective way to treat wastewater from farm bioreactors. In addition to the environmental benefits, the productive duckweed biomass of the produced during wastewater treatment contains a high content of nutrients, especially protein that positions it as an additional ingredient in the feed of farm animals, poultry and fish. The influence of cultivation conditions of *Lemna minor* on protein synthesis taking into account the variation of nutrient concentration in wastewater are studied. The cultivation system combining an anaerobic bioreactor as well as the system of growing duckweed is used. Specific growth rate of duckweed, which was 2.68; 3.85 and 4.61 g/(m^2/day) of the substrate concentration of 20, 40 and 60% respectively, is determined. The maximum growth density has been obtained (g/m^2): 67.4 for 20% of the substrate on the 30th day; 63.0 for 40% of the substrate and 66.0 for 60% of the substrate on the 27th day of cultivation. The dynamics of total Kjeldahl nitrogen content in duckweed has been studied. The greatest content of total nitrogen in duckweed grown on nutrient medium with 20% substrate concentration is observed on the 15th day with a maximum accumulation rate of 0.16 g/m^2/day. On the 21st day of

cultivation in a substrate with 40% concentration a maximum total nitrogen is recorded at a storage rate of 0.20 g/m^2/day; with a 60% wastewater content - at a rate of 0.24 g/m^2/day. The dynamics of protein synthesis in the duckweed has been studied. In the course of the experiment it has been found that on the 16th day of cultivation the maximum percentage of protein content in the duckweed for 20% substrate is observed as 27.62%, while for 40% it is 28.13% and for 60% - of 29.14% to the 19-th day of cultivation. Based on the results of the studies, a mathematical model has been calculated, which can be considered adequate, and can be used to predict the protein content of the duckweed species *Lemna minor* depending on the nutrient concentration in the substrate and the duration of cultivation.

Keywords. Duckweed; *Lemnaceae; Lemna minor*; cultivation; total nitrogen; protein, modeling

Введение

Ряска – это свободно плавающее водное растение семейства *Lemnacea.* Это семейство классифицируется на четыре рода: *Spirodela, Lemna, Wolffiella* и *Wolffia*. Внутривидовое различие определяется ботаническими характеристиками (размерами листьев, наличием корня и пр.) [1].

В настоящее время применение ряски рассматривается как дешевый и эффективный способ снижения концентрации питательных веществ в сточных водах, полученных из биореакторов сельскохозяйственных ферм. В дополнение к экологическим преимуществам продуктивная биомасса ряски, произведенная во время очистки сточных вод, содержит высокое содержание эссенциальных веществ, особенно протеина (до 45 %). За последние 30 лет исследователи продемонстрировали потенциальные возможности использования ряски в качестве дополнительного ингредиента рациона сельскохозяйственных животных, птицы и рыб [2–7]. Клетки ряски содержат мало лигнина, вследствие чего ряска легко переваривается в желудке животных, облегчается доступ к усвояемому белку [8].

В связи с высокой скоростью роста и высоким содержанием протеина, производительность ряски по протеину может быть в десятки раз больше, чем у сои [1]. Cheng и др. [9] установили, что скорость роста ряски составляет до 104 т/га в год. Для небольших фермерских хозяйств выгодно использовать недорогие системы очистки сточных вод на основе ряски. При этом образуется также добавочная протеиновая биомасса [2, 3, 5]. По мнению исследователей [10] наиболее логично сосредоточиться на виде ряски *Lemnaceae* для использования ее в водных системах, сконструированных для поглощения питательных веществ из отходов животноводческих ферм. Производство сухой биомассы этого вида более высокое по сравнению с другими.

Зарубежными учеными [11,12] изучена также пищевая ценность ряски *Lemnacea* с точки зрения возможности ее использования в качестве пищи для человека. Показано, что содержание белка в ряске составляет от 20 до 35 %, жира – от 4 до 7 % и крахмала – от 4 до 10 % в пересчете на сухое вещество. Установлено, что содержание ряда аминокислот в ряске близко к рекомендациям ВОЗ. Более того, это растение содержит также и ценные омега-3 жирные кислоты (в т.ч. и альфа-линоленовую кислоту). Содержание аминокислот в ряске вида *L. minor* представлено на рис. 1.

В современной фармакологии эффективным производственным базисом для производства антител учеными признаны растения [13,14]. Особый интерес вызывают промышленные ферменты растительного происхождения. Биокатализаторы широко используются во многих промышленных производствах, поэтому их стоимость не должна быть лимитирующим фактором. Основной проблемой применения промышленных белков является необходимость значительных по площади земельных участков для выращивания трансгенных растений. Кроме того, необходимо широкое признание открытой культивации растений для производства белка [15].

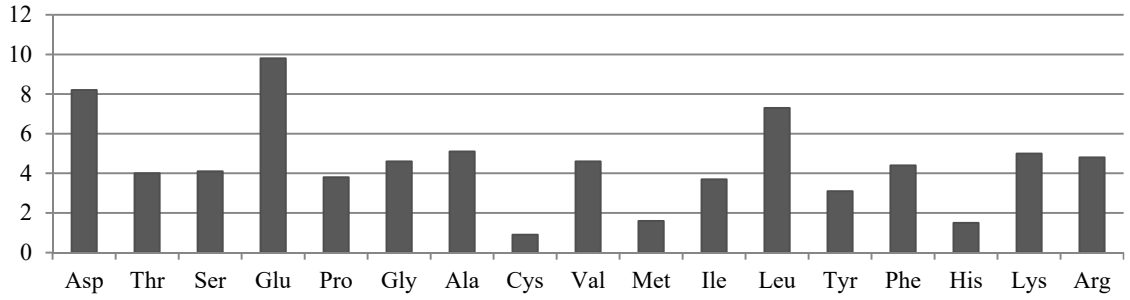

Рис. 1. Аминокислотный состав белков в ряске вида *L. minor* (г/100 г белка) [11]

Помимо сельскохозяйственного вектора развития ряска является идеальным сырьем для производства рекомбинантных белков [16]. Это быстрорастущее и легкодоступное растение способно продуцировать сложные белки, которые трудно получить из микроорганизмов, или произведенных в течение длительного периода времени клетками млекопитающих. Кроме того, ряска съедобна и, следовательно, представляет собой привлекательную систему для пероральных вакцин [6, 7, 17]. Учеными биотехнологической компании Biolex Inc. (США) ведутся разработки системы для производства фармацевтических белков на основе ряски *Lemnacea* [11].

Для того чтобы платформа по производству белка из ряски была экономически целесообразной

для промышленного производства, необходимо решить ряд вопросов, в том числе интенсифицировать методы культивирования как в открытых, так и закрытых системах [6].

Существуют две основные категории биореакторов, обычно используемых для культивирования растений, клеток, тканей и органов: жидко- и газофазные реакторы [18]. Наиболее часто используются реакторы на жидкой фазе, но остается проблемой доставка кислорода в погруженные клетки или ткани. Большинство растительных клеток и тканей подвержены стрессу сдвига, поэтому, в отличие от микробных клеток, агрессивное возбуждение не особенно полезно. Газофазные реакторы с минимальным сдвигом решают проблему доставки O_2 [18].

Таким образом, оптимизация процесса производства, использование регуляторных элементов, а также разработка усовершенствованных систем культивирования в фотобиореакторах имеют актуальное значение в производстве протеина из ряски семейства *Lemnaceae*.

Целью настоящих исследований является изучение влияния условий культивирования ряски *Lemna minor* на синтез белка с учетом варьирования концентрации питательных веществ в сточных водах.

Объекты и методы исследования

В работе применялась система культивирования, объединяющая анаэробный биореактор и собственно систему выращивания ряски. Анаэробный реактор производил энергию и раствор питательных веществ, который использовался как субстрат для культивирования. Для освещения использовали фотолампу FLUORA OSRAM, установленную на расстоянии 0,6 м над водной поверхностью и работающую 16 часов в день. Поток фотонов от лампы составлял 140 мкмоль/м^2-с (PPF). В автоматическом режиме в фотобиореакторе поддерживалась температура (25±1) ºС. Подача воздуха осуществлялась периодически. Каждый день производилось ручное перемешивание содержимого ванн в течение 5 мин.

Для подавления роста водорослей и имитирования природных условий использовались ванны, изготовленные из светонепропускаемого материала.

Материалами исследований служили ряска вида *Lemna minor*, выращенная в лабораторных и естественных условиях водоема (г. Томск), исходные образцы сточных вод из метантенка, отличающиеся концентрацией питательных веществ.

Образцы ряски представляли собой: образец № 1, выращенный в искусственном водоеме, с добавлением питательных веществ, с применением специальной фотолампы FLUORA OSRAM; образец № 2, нативная ряска, выращенная в естественной среде (контроль).

Влажность ряски определяли гравиметрическим методом (температура воздуха в сушильном шкафу составляла 105 °С, продолжительность высушивания 9 ч).

Для определения общего азота и количества белка был использован метод Кьельдаля (по ГОСТ 10846). Для пересчета на белковые вещества количество азота умножали на коэффициент 6,25 [11, 19].

Анализ питательной среды для выращивания ряски (сточных вод из метантенка) проводили в Центре управления научно-исследовательским оборудованием Томского Государственного Университета (ТГУ), а также в аккредитованной межвузовской лаборатории радиационной спектроскопии Томского Политехнического Университета (ТПУ): содержание ионов аммония (ГОСТ 33045 (метод А), фотометр КФК-3-01), фосфат-ионов (ГОСТ 18309 (метод А), фотометр КФК-3-01), химическое потребление кислорода (ХПК) – методом по ПНД Ф 14.1:2:4.154-99 (Флюорат 02-3М) (табл. 1). Количественное определение общего азота проводили в лаборатории кафедры «Технология бродильных производств и консервирования» ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)».

Таблица 1

Состав субстрата (сточных вод из метантенка)

Показатель	Концентрация (г/м^3)	Показатель	Концентрация (г/м^3)	Показатель	Концентрация (г/м^3)
ХПК	2237,50±15,00	Na	103,00±15,45	K	402,00±48,00
PO_4^{3-}	22,80±0,80	Ni	$6{,}70\times10^{-2}\pm0{,}80\times10^{-2}$	Mg	45,20±5,42
NH_4^+	199,50±15,00	Pb	$2{,}50\times10^{-2}\pm0{,}30\times10^{-2}$	Mn	1,46±0,17
NO_3^-	20,80±2,50	Zn	$25{,}10\times10^{-2}\pm3{,}01\times10^{-2}$	Mo	$0{,}78\times10^{-2}\pm0{,}09\times10^{-2}$
NO_2^-	0,92±0,11	Cu	$7{,}20\times10^{-2}\pm1{,}08\times10^{-2}$	Ca	85,50±10,26
Fe	8,85±1,32	B	4,13±0,62	Co	$1{,}50\times10^{-2}\pm0{,}18\times10^{-2}$

Для статистической обработки данных использовалась программа Microsoft Excel и пакет программ Statistica 8,0.

Результаты и их обсуждение

Схема проведения эксперимента состояла из следующих этапов.

Всего было приготовлено 10 групп образцов. Каждая группа состояла еще из трех подгрупп. Подгруппы отличались концентрацией субстрата. В первой подгруппе концентрация субстрата составляла 20 %, во второй – 40 %, в третьей – 60 %. Каждая подгруппа состояла в свою очередь из трех образцов с ряской и одного контрольного образца (без ряски). Данное детальное деление опытов проводилось для обеспечения возможности периодичного отбора проб через каждые 3 суток (два раза в неделю). В десятой группе ряска выращивалась 34 дня. После каждого отбора проб высвободившуюся ряску подвергали высушиванию и фиксировали массу.

Для устранения такого фактора, как испарение воды из образцов, каждые 3 суток в образцы вносили дистиллированную воду при перемешивании до исходного объема.

Как показал анализ научной информации, предыдущие исследования ученых в области получения из ряски кормовых добавок для животных не охватывали в полной мере процесс оптимизации. Сточные воды, сосредоточенные в специальных водоемах, постоянно подвергаются разбавлению за счет атмосферных осадков. Поэтому исследования велись с учетом варьирования концентрации сточных вод.

Первоначально изучена динамика накопления биомассы ряской (рис. 2), т.к. этот показатель напрямую связан с выходом конечного продукта – протеина. Использовали образец ряски № 1.

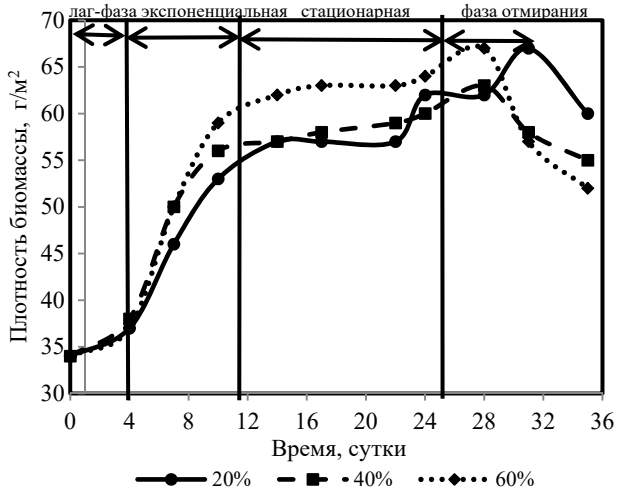

Рис. 2. Динамика изменения плотности биомассы для субстратов с различной концентрацией

Установлено, что стадия адаптации ряски к измененным искусственно условиям культивирования имела довольно короткий период и составила 4 суток для всех образцов. С увеличением концентрации субстрата плотность биомассы ряски во время экспоненциальной фазы увеличивалась. После месяца эксперимента отмечен переход ряски в фазу «отмирания» по причине достижения максимальной плотности биомассы на единицу поверхности.

В ходе эксперимента определена удельная скорость роста ряски для растворов с начальной концентрацией субстрата 20 %, 40 % и 60 %, которая составила 2,68; 3,85 и 4,61 г/(м^2·сут) соответственно.

Максимальная плотность роста была достигнута (в г/м^2): 67,4 – для 20 % субстрата на 30-е сутки; 63,0 – для 40 % субстрата и 66,0 – для 60 % субстрата на 27-е сутки культивирования. После чего прирост биомассы прекратился для всех образцов.

На следующем этапе провели изучение динамики накопления азота и белка в ряске. В природе азот присутствует в нескольких формах: общий азот, общий азот по Кьельдалю (TKN), аммиак, органический азот, нитраты и нитриты. С этой позиции важно понимать отношения различных форм азота.

В исходном субстрате (сточные воды из метантенка) отмечена достаточно низкая концентрация нитратов (табл. 1). При этом отношение ионов аммония к нитратам составила 10:1.

Большие концентрации нитритов в сточных водах (более 1 г/м^3) обычно диагностируются, когда растение частично нитрифицировано. В исходном применяемом субстрате содержание нитритов составляет 0,92 г/м^3 (табл. 1).

Учеными установлено, что значительная часть азота приходится на аммоний (NH_4^+) если pH сточных вод находится в кислой или нейтральной зоне. В щелочной зоне (при pH более 8,0) азот главным образом представляет собой аммиак (NH_3). Общий азот по Кьельдалю (*TKN*) включает в себя аммоний и органический азот:

$$TKN = NH_4^+ + \text{орг. азот}$$

Так как общий азот в сточных водах на 93,1 % состоит из аммония [20], ряска хорошо ассимилирует азот в данной форме. Согласно условиям эксперимента, в растворе с концентрацией субстрата 20 % количество аммония составило 37,0 г/м^3; в растворе с 40%-ой концентрацией – 80,1 г/м^3; а с 60%-ой – 121,0 г/м^3.

Максимальное содержание общего азота по Кьельдалю в ряске, выращенной на питательной среде с 20 % концентрацией субстрата, наблюдалось на 15-е сутки эксперимента с максимальной скоростью накопления 0,16 г/м²/сутки. На 21-е сутки культивирования в субстрате с 40%-ой концентрацией был зафиксирован максимум общего азота при скорости накопления 0,20 г/м²/сутки; с 60%-ным содержанием сточных вод – при скорости 0,24 г/м²/сутки (рис. 3).

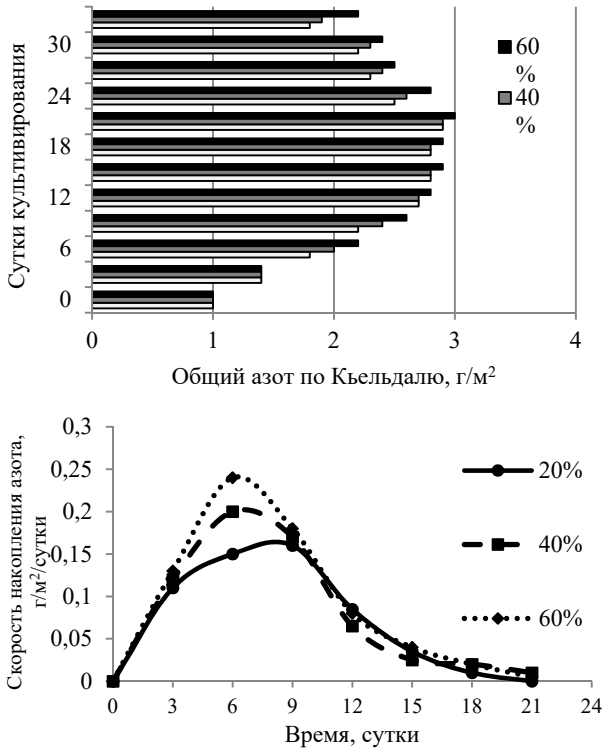

Рис. 3. Динамика накопления азота в образцах ряски

Исследованиями ученых [21] установлено, что содержание белка зависит от условий культивирования ряски. Например, в биомассе ряски, перенесенной из искусственной среды в чистую воду, отмечалось снижение содержания белка, но увеличение содержания крахмала. Также было выявлено, что световые условия не влияют на аминокислотный состав ряски [21].

В настоящих исследованиях для определения разности содержания белка в ряске согласно разным условиям культивирования были взяты образцы растения – № 1, № 2 (контроль – нативная ряска, выращенная в естественных условиях водоема).

По завершению процесса культивирования (после 1 мес.) в образце № 2 зафиксирован процент протеина – (25,17±0,03) %. Для наблюдений динамики процесса использовали образец № 1. Показано, что в субстрате с 20%-ной концентрацией сточных вод содержание белка составило 83,23 мг (16,16 г/м²) при максимальной скорости накопления 0,97 г/м²/сутки; в растворе с 40%-ным содержанием субстрата – 85,65 мг (16,63 г/м²) при скорости 1,27 г/м²/сутки; а для образца, содержащего 60 % питательных веществ, – 93 мг (18,06 г/м²) со скоростью аккумуляции 1,49 г/м²/сутки. В ходе эксперимента установлено, что на 16-е сутки культивирования был зафиксирован максимальный процент содержания белка в ряске для 20%-ного субстрата – 27,62 %, в то время как в 40%-ном – 28,13 % и в 60%-ном – 29,14 % – на 19-е сутки выращивания (рис. 4).

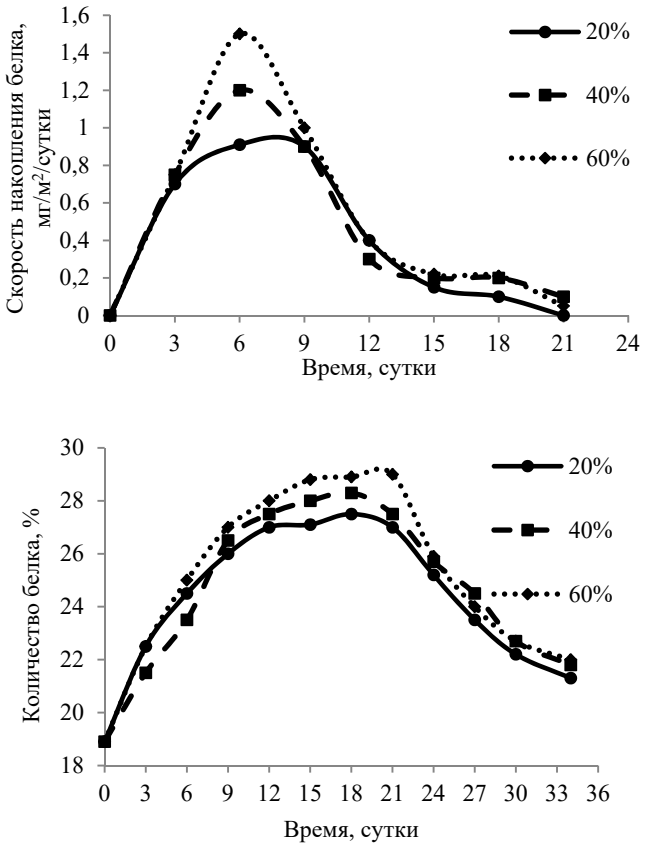

Рис. 4. Динамика накопления белка в ряске (образец № 1)

По полученным обобщенным данным расчетным путем определено, что вид ряски *L. minor* способен производить белка до 5,5 т/га в год.

На заключительном этапе эксперимента была проведена математическая обработка данных, в ходе которой требовалось установить силу зависимости факторов, а также смоделировать уравнения для определения количественных значений факторов, влияющих на содержание белка в ряске болотной.

Объектом исследования явились образцы ряски болотной, выращенные в лабораторных условиях в средах с различным содержанием питательных веществ. Предметом исследования явилась зависимость содержания белка, выраженная в процентах, от изменяемых параметров выращивания (количество суток, процентное содержание питательных веществ в субстрате).

За зависимый фактор было принято содержание белка (*Pr)*. За независимые переменные были взяты количество суток выращивания (*D*), процентное содержание питательных веществ (*P*).

Анализ проводился в программе Statistica 8,0 с помощью модулей «Промышленная статистика», «Нелинейное оценивание» и «Общие регрессионные модели». Модель, полученная с помощью модуля «Полиномиальные модели», имеет лучшие показатели, поэтому далее приведено именно ее описание.

Полученная модель классифицирована как аналитическая эмпирическая динамическая (время выражено в днях) стохастическая нелинейная математическая модель.

Полученный в ходе расчетов коэффициент корреляции (R) равен 0,526. Это среднее значение, что говорит о средней зависимости выходной переменной от входных переменных. Коэффициент детерминации (R^2) данной модели равен 0,277. Из этого следует, что доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, равна 27,7 %. F-критерий Фишера имеет достаточное значение (F=2,684), чтобы утверждать, что модель является адекватной и может быть использована для принятия решений к осуществлению прогнозов. Рассматриваемая модель является статистически значимой, т.к. p-уровень составляет 5,18 %. Это показывает, что модель с вероятностью 0,0518 будет являться лишь случайным совпадением для данной выборки.

В табл. 2 приведены коэффициенты регрессии модели. Статистическая значимость (p-уровень) у половины коэффициентов низкая, в пределах 0,8–2,1 %, у второй высокая – 28–30 %. Это показывает, что каждый найденный коэффициент с вероятностью, равной соответствующему ему p-уровню, будет говорить, что найденная зависимость является лишь случайной особенностью данной выборки. Аналогичные результаты отображает t-критерий Стьюдента. Он имеет достаточное значение, чтобы говорить о средней статистической значимости коэффициентов, причем наиболее точными будут коэффициенты при D, D^2, а также свободный член I. В соответствии с этим оценены коэффициенты β.

Данный коэффициент оценивает меру чувствительности одной переменной к другой. Это означает, что фактор Pr в равной степени чувствителен ко всем факторам.

Таблица 2

Коэффициенты модели

	Коэффициент	t-критерий Стьюдента	p	β
I	24,16566	8,66621	0,000000	
D	0,33807	2,44363	0,021100	1,45956
D^2	-0,01266	-2,85130	0,008087	-1,70306
P	-0,15450	-1,02092	0,316030	-1,14820
P^2	0,00204	1,08890	0,285482	1,22465

Полученная по ходу исследования модель имеет общий вид.

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_{11} * x_1^2 + b_2 * x_2 + b_{22} * x_2^2. \quad (1)$$

Подставляя в формулу (1) коэффициенты модели из табл. 2, получаем итоговую модель, позволяющую прогнозировать значения зависимой переменной.

$$Pr = 24{,}16566 + 0{,}33807 * D - 0{,}01266 * D^2 - \\ -0{,}15450 * P + 0{,}00204 * P^2 . \quad (2)$$

Используя данную модель можно сравнить наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) зависимой переменной с предсказанными (полученные с помощью математической модели). Разница наблюдаемых и предсказанных значений оценена с помощью относительной погрешности по формуле

$$\Delta Pr = \frac{|Pr^{\text{Набл}} - Pr^{\text{Эксп}}|}{Pr^{\text{Набл}}} * 100\% . \quad (3)$$

Из анализа результатов можно сделать вывод, что остатки от сравнения достаточно малы, а среднее значение относительной погрешности составляет 7,1 %, что укладывается в принятый на практике 10%-ый интервал. Следовательно, модель можно использовать для предсказания значений зависимой переменной. На рис. 5 представлен график поверхности модели.

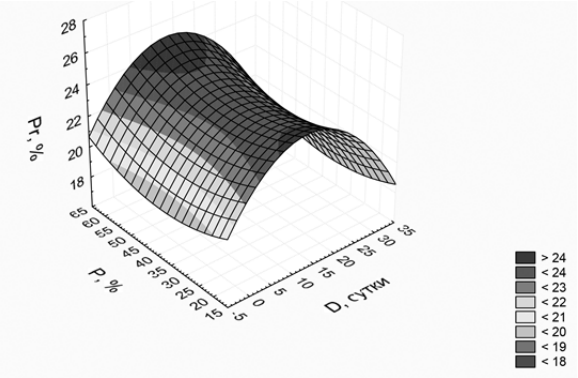

Рис. 5. График поверхности модели

По графику можно проанализировать количество получаемого белка в зависимости от количества дней культивирования и концентрации питательных веществ в субстрате. Поверхность модели является седлообразной, демонстрирует точки максимального содержания белка. По приведенной на рисунке легенде можно сделать выводы о благоприятных условиях для наибольшего содержания белка. Ввиду приведенных выше рассуждений, модель, полученная в ходе исследования, может считаться адекватной и может быть использована для дальнейшего тестирования, а также для проверки предсказанных максимальных значений содержания белка в ряске болотной.

Выводы

Таким образом, изучено влияние условий культивирования ряски *Lemna minor* на синтез белка с учетом варьирования концентрации питательных веществ в сточных водах. Определена удельная скорость роста ряски, динамика содержания общего азота по Кьельдалю в ряске, выращенной в течение месяца в искусственных условиях на растворах субстрата с начальной концентрацией питательных веществ 20, 40 и 60 %. Изучена динамика синтеза белка в искусственно культивированной ряске. По итогам исследований рассчитана математическая модель, которая может считаться адекватной, и быть использована для прогнозирования содержания белка в ряске вида *Lemna minor* в зависимости от концентрации питательных веществ в субстрате и продолжительности культивирования.

Список литературы

1. Landolt, E. Biosystematic investigations in the family of duckweeds (*Lemnacea*), Vol. 4: the family of Lemnacea – a monographic study, Vol. 2 (phytochemistry, physiology, application, bibliography) / E. Landolt, R. Kandeler // Veroeffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, Stiftung Ruebel (Switzerland). – 1987. – P. 211–234.

2. Hassan, M.S. Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla* and *Spirodela polyrrhiza*) as feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) / M.S. Hassan, P. Edwards // Aquaculture. – 1992. – Vol. 104. – no. 3–4. – P. 315–326.

3. Performance of broiler chickens fed diets containing duckweed (*Lemna gibba*) / A.T. Haustein et al. // The Journal of Agricultural Science. – 1994. – Vol. 122. – no. 2. – P. 285–289.

4. Hillman, W.S. The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming / W.S. Hillman, D.D. Culley //American Scientist. – 1978. – Vol. 66. – no. 4. – P. 442–451.

5. Skillicorn, P. A New Aquatic Farming System for Developing Countries / P. Skillicorn, W. Spira, W. Journey // The World Bank Group. – 1993. – 76 p.

6. Stomp, A.M. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing / A.M. Stomp // Biotechnology Annual Review. – 2005. – Vol. 11. – P. 69–99.

7. Genetic transformation of duckweed *Lemna gibba* and *Lemna minor* / Yamamoto Y. T. et al. // In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. – 2001. – Vol. 37. – no. 3. – P. 349–353.

8. Leng, R.A. Duckweed-a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish / R.A. Leng, J.H. Stambolie, R. Bell // Livestock Research for Rural Development. – 1995. – Vol. 7. – no. 1. – P. 36.

9. Modification of plant N-glycans processing: The future of producing therapeutic protein by transgenic plants / M. Cheng et al. // Medicinal research reviews. – 2005. – Vol. 25. – no. 3. – P. 343–360.

10. Bhanthumnavin, K. *Wolffia arrhiza* as a possible source of inexpensive protein / K. Bhanthumnavin, M.G. MCGARRY // Nature. – 1971. – Vol. 232. – no. 5311. – P. 495.

11. Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food / K.J. Appenroth et al. // Food chemistry. – 2017. – Vol. 217. – P. 266–273.

12. Survey of duckweed diversity in Lake Chao and total fatty acid, triacylglycerol, profiles of representative strains / J. Tang et al. // Plant Biology. – 2015. – Vol. 17. – no. 5. – P. 1066–1072.

13. Paul, M. Plant-made pharmaceuticals: Leading products and production platforms / M. Paul, J.K.C. Ma // Biotechnology and applied biochemistry. – 2011. – Vol. 58. – no. 1. – P. 58–67.

14. *Spirodela* (duckweed) as an alternative production system for pharmaceuticals: a case study, aprotinin / S. Rival et al. // Transgenic research. – 2008. – Vol. 17. – no. 4. – P. 503–513.

15. Horn, M.E. Plant molecular farming: systems and products / M.E. Horn, S.L. Woodard, J.A. Howard // Plant cell reports. – 2004. – Vol. 22. – no. 10. – P. 711–720.

16. Green factory: plants as bioproduction platforms for recombinant proteins / J. Xu et al. // Biotechnology advances. – 2012. – Vol. 30. – no. 5. – P. 1171–1184.

17. Characterisation of the oral adjuvant effect of lemnan, a pectic polysaccharide of *Lemna minor* / S.V. Popov et al. // Vaccine. 2006. – Vol. 24. – no. 26. – P. 5413–5419.

18. Kim, Y. Secondary metabolism of hairy root cultures in bioreactors / Y. Kim, B.E. Wyslouzil, P.J. Weathers // In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. – 2002. – Vol. 38. – no. 1. – P. 1–10.

19. Casal, J.A. A test of two methods for plant protein determination using duckweed / J.A. Casal, J.E. Vermaat, F. Wiegman // Aquatic Botany. – 2000. – Vol. 67. – no. 1. – P. 61–67.

20. Xu, J. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production / J. Xu, G. Shen // Bioresource Technology. – 2011. – Vol. 102. – no. 2. – P. 848–853.

21. Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol / J. Xu et al. // Biosystems engineering. – 2011. – Vol. 110. – no. 2. – P. 67–72.

References

1. Landolt E., Kandeler R. *Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnacea), Vol. 4: the family of Lemnacea - a monographic study, Vol. 2 (phytochemistry, physiology, application, bibliography).* Zurich, Switzerland: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes ETH, Stiftung Ruebel Publ., 1987, pp. 211–234.

2. Hassan M.S., Edwards P. Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla and Spirodela polyrrhiza*) as feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 1992, vol. 104, no. 3–4, pp. 315–326. DOI: 10.1016/0044-8486(92)90213-5.

3. Haustein A.T. et al. Performance of broiler chickens fed diets containing duckweed (*Lemna gibba*). *The Journal of Agricultural Science*, 1994, vol. 122, no. 2, pp. 285–289.

4. Hillman W.S., Culley D.D. The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming. *American Scientist*, 1978, vol. 66, no. 4, pp. 442–451.

5. Skillicorn P., Spira W., Journey W. A *New Aquatic Farming System for Developing Countries*. Washington: The World Bank Group Publ., 1993. 76 p.

6. Stomp A.M. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing. *Biotechnology Annual Review*, 2005, vol. 11, pp. 69–99.

7. Yamamoto Y.T. et al. Genetic transformation of duckweed *Lemna gibba* and *Lemna minor*. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 349–353.

8. Leng R.A., Stambolie J.H., Bell R. Duckweed-a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*, 1995, vol. 7, no. 1, p. 36.

9. Cheng M. et al. Modification of plant N-glycans processing: the future of producing therapeutic protein by transgenic plants. *Medicinal research reviews*, 2005, vol. 25, no. 3, pp. 343–360.

10. Bhanthumnavin K., Mcgarry M.G. Wolffia arrhiza as a possible source of inexpensive protein. *Nature*, 1971, vol. 232, no. 5311, pp. 495–495.

11. Appenroth K. J. et al. Nutritional value of duckweeds (Lemnaceae) as human food. *Food chemistry*, 2017, vol. 217, pp. 266–273.

12. Tang J. et al. Survey of duckweed diversity in Lake Chao and total fatty acid, triacylglycerol, profiles of representative strains. *Plant Biology*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 1066–1072.

13. Paul M., Ma J.K.C. Plant-made pharmaceuticals: Leading products and production platforms. *Biotechnology and applied biochemistry*, 2011, vol. 58, no. 1, pp. 58–67.

14. Rival S. et al. *Spirodela* (duckweed) as an alternative production system for pharmaceuticals: a case study, aprotinin. *Transgenic research*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 503–513.

15. Horn M.E., Woodard S.L., Howard J.A. Plant molecular farming: systems and products. *Plant cell reports,* 2004, vol. 22, no. 10, pp. 711–720.

16. Xu J. et al. Green factory: plants as bioproduction platforms for recombinant proteins. *Biotechnology advances*, 2012, vol. 30, no. 5, pp. 1171–1184. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.08.020.

17. Popov S.V. et al. Characterisation of the oral adjuvant effect of lemnan, a pectic polysaccharide of *Lemna minor L. Vaccine*, 2006, vol. 24, no. 26, pp. 5413–5419.

18. Kim Y., Wyslouzil B.E., Weathers P.J. Secondary metabolism of hairy root cultures in bioreactors. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 1–10.

19. Casal J.A., Vermaat J.E., Wiegman F. A test of two methods for plant protein determination using duckweed. *Aquatic Botany*, 2000, vol. 67, no. 1, pp. 61–67.

20. Xu J., Shen G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, no. 2, pp. 848–853.

21. Xu J. et al. Production of high-starch duckweed and its conversion to bioethanol. *Biosystems engineering*, 2011, vol. 110, no. 2, pp. 67–72.

Дополнительная информация / Additional Information

Сергеева, И.Ю. Моделирование процесса синтеза белка в ряске *Lemna minor* / И.Ю. Сергеева, А.А. Аль Кассаб // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 46. – № 3. – С. 74–81.

Sergeeva I.Yu., Kassab A.A. Al. Modeling the process of protein synthesis in the duckweed *Lemna minor. Food Processing: Techniques and Technology,* 2017, vol. 46, no. 3, pp. 74–81 (In Russ.).

© Сергеева Ирина Юрьевна
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии бродильных производств и консервирования, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-55,
e-mail: sergeeva.76@list.ru

© Али А. Алькассаб
аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30.

© Irina Yu. Sergeeva
Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Zymurgy and Food Preservation Technology, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia,
phone: +7 (3842) 39-68-55, e-mail: sergeeva.76@list.ru

© Ali A. Al Kassab
Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia