

Научная статья

УДК 579.66

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-1-21-29

Влияние водородного показателя и концентрации хлорида натрия на биосинтез бактериоруберина

Е.Ю. Иванова, А.О. Причеп, Г.Ф. Курбанов, Н.Ю. Шарова*

*ВНИИ пищевых добавок – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН
Санкт-Петербург, Россия, *n.sharova@fncps.ru*

Аннотация. Изучали влияние концентрации хлорида натрия (NaCl) и водородного показателя (pH) питательной среды на способность культуры *Arthrobacter agilis* wb28 синтезировать бактериоруберин с целью повысить выход целевого вещества. В качестве базовой среды использовалась LB, которая подвергалась модификации. Для определения концентрации бактериоруберина пигмент предварительно экстрагировали метанолом из осажденной бактериальной биомассы. Полученный экстракт анализировали спектрофотометрически, измеряя его оптическую плотность при длине волны 495 нм. Для оценки роста микроорганизма проводили культивирование в шейкере-инкубаторе, а также в биореакторе вместимостью 1 дм³, при температуре +28°C на протяжении 24 ч. Определены границы параметров, где при 10% NaCl и pH более 9,1 видимый рост отсутствовал, а биосинтез ингибировался. Установлено, что оптимальным значением pH для биосинтеза бактериоруберина является значение 8,5, при котором наблюдались максимальные показатели накопления пигмента при сохранении высокой скорости роста культуры. Наиболее благоприятной концентрацией NaCl стала концентрация 0%, обеспечивающая наибольший выход целевого продукта. При снижении pH ниже 5,0 рост культуры не зафиксирован, что, вероятно, обусловлено физиологическими особенностями штамма и его адаптацией к существованию преимущественно в нейтральных и щелочных условиях среды.

Ключевые слова: биотехнологии; биосинтез бактериоруберина; *Arthrobacter agilis*; пигменты; красители; каротиноиды

Original article

Effect of hydrogen index and sodium chloride concentration on bacterioruberin biosynthesis

Ekaterina Yu. Ivanova, Artem O. Prichepa, Gabdulla F. Kurbanov, Natalya Yu. Sharova*

*¹All-Russian Scientific Research Institute of Food Additives –
Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS,
St. Petersburg, Russia, *n.sharova@fncps.ru*

Abstract. This study investigated the effect of sodium chloride (NaCl) concentration and medium pH on the ability of *Arthrobacter agilis* wb28 to synthesize bacterioruberin. This compound is a carotenoid in nature and plays a functional role in protecting the cell against environmental stress, including oxidative and osmotic stress; therefore, it has attracted considerable attention as a potent antioxidant, antimicrobial agent, and radioprotective compound, with broad applications in the cosmetic, pharmaceutical, and food industries. To date, several potential producers of bacterioruberin have been identified; however, all of them are haloarchaea characterized by prolonged cultivation periods. The aim of this work was to increase the yield of the target compound by varying the nutrient medium parameters for the producer *A. agilis* wb28, one of the few prokaryotes capable of bacterioruberin biosynthesis. Luria–Bertani (LB) medium was used as the basal medium and subjected to modification. To determine bacterioruberin concentration, the pigment was preliminarily extracted with methanol from harvested bacterial biomass, and the resulting extract was analyzed spectrophotometrically by measuring optical density at 495 nm. Microbial growth was assessed during cultivation in a shaker-incubator and in a 1 L bioreactor at +28 °C for 24 h. The parameter limits were established as follows: at 10% NaCl and pH values above 9.1, visible growth was absent and biosynthesis was inhibited. The optimal pH for bacterioruberin biosynthesis was determined to be 8.5, at which maximum pigment accumulation was observed while maintaining a high culture growth rate, whereas the most favorable NaCl concentration was 0%, providing the highest yield of the target product. No culture growth was observed at pH values below 5.0, which is likely attributable to the physiological characteristics of the strain and its adaptation to predominantly neutral and alkaline environmental conditions.

Keywords: biotechnology; biosynthesis bacterioruberin; *Arthrobacter agilis*; pigments; colorants; carotenoids

Введение

Бактериоруберин (БР) представляет собой неполярный пигмент красного цвета, характерный для галофильных архей и других экстремофилов. Он имеет в структуре 50 атомов углерода, является каротиноидом класса ксантофиллов и привлекает внимание благодаря мощным антиоксидантным свойствам, обеспечивающим защиту клеток от окислительного стресса [1]. В отличие от бета-каротина, каротиноидный профиль архей, основу которого составляет бактериоруберин, характеризуется значительной эффективностью в тесте на поглощение радикала DPPH. Полученные данные подтверждают, что бактериоруберин является более мощным антиоксидантом по сравнению с бета-каротином [2]. Интерес к нему как к перспективной биомолекуле возник сравнительно недавно: основные сферы его возможного применения выявили только в последние десять лет. Сегодня этот каротиноид рассматривается как многофункциональное соединение, востребованное в биомедицине, пищевой, фармацевтической и текстильной промышленности [3]. Таким образом, оптимизация параметров культивирования является необходимой для увеличения выхода бактериоруберина и снижения его себестоимости. В связи с этим цель данной работы – исследовать влияние концентрации NaCl и pH среды на продуктивность штамма-продуцента.

Биосинтез бактериоруберина у галофильных архей регулируется комплексом факторов, среди которых ключевую роль играют состав питательной среды, соленость, осмотические условия и стадия роста микроорганизмов. Для повышения выхода используют осмотический шок в логарифмической фазе, поскольку его синтез сопряжен с делением клеток [4]. На синтез бактериоруберина у *Haloterrigena sp.* SGH1 влияет содержание соли и наличие света. Каротиногенез является обратимым солезависимым процессом: перенос клеток из среды с высокой концентрацией NaCl (25%) в среду с низкой (15%) вызывает депигментацию, а возвращение в условия высокой солености восстанавливает содержание бактериоруберина [5]. Для *Haloferax marinum* тип и концентрация источников углерода и азота определяют способность к пигментации, поскольку специфичность утилизации субстратов влияет на эффективность роста и направленность биосинтетических путей. Следовательно, оптимизация состава питательной среды по этим параметрам необходима для достижения максимальной продуктивности биомассы и целевых метаболитов [6]. Для прокариот, в частности *Arthrobacter agilis* N20, было выявлено влияние питательной среды, а также минеральных солей [7]. На синтез бактериоруберина у *Arthrobacter agilis* существенно воздействуют температура и соленость среды [8]. Все это подтверждает значение абиотических факторов в регуляции пигментообразования.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбран штамм *Arthrobacter agilis* wb28, выделенный из пшеничных отрубей [9].

Хранение культуры проводили на агаризованной питательной среде, указанной в паспорте штамма в качестве стандартной, LB (Lysogeny broth), состава (г/л): пептон – 10,0; дрожжевой экстракт – 5,0; NaCl – 10,0; агар – 15,0. Культивирование проводили при температуре $28 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 48 ч.

Выращивание микроорганизмов и последующий засев в подготовленные среды осуществляли путем посева в стандартную жидкую среду без добавления агара. Культивирование проводили при температуре $28 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 3 суток в шейкере-инкубаторе Multitron HT (Inforce, Швейцария) при постоянном перемешивании 180 об/мин.

Вследствие внутриклеточного накопления каротиноида экстракцию бактериоруберина выполняли следующим образом. Полученную в результате культивирования биомассу осаждали с помощью центрифуги MiniSpin (Eppendorf, Германия) при $g = 13000$ в течение 10 мин. После удаления супернатанта осадок растворяли в дистиллированной воде и снова осаждали описанным выше способом, дважды. Для последующего разрушения клеточной стенки образцы погружали в ультразвуковую ванну Sonorex Digital 10p (Bandelin, Германия) на 20 мин, далее центрифугировали и диспергировали полученный осадок в метаноле с концентрацией 99,5%. Образовавшуюся суспензию перемешивали в термошейкере ThermoMixer C (Eppendorf, Германия) в течение 10 мин на 600 rpm. Далее образцы снова центрифугировали; спектр полученного в результате экстракта бактериоруберина анализировали

с использованием спектрофотометра BioSpectrometer (Eppendorf, Германия) в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм против метанола, имеющего концентрацию 99,5%. Таким образом, была определена длина волны 495 нм для проведения дальнейших измерений, так как она имела наивысшую интенсивность сигнала.

Анализ выхода целевого продукта проводили путем предварительной экстракции и последующей спектрофотометрии на приборе Eppendorf BioSpectrometer против метанола (99,5%) при ранее определенной длине волны 495 нм.

Накопление биомассы оценивали с помощью измерения мутности спектрофотометрическим методом при длине волны 600 нм спектрофотометром BioSpectrometer (Eppendorf, Германия).

Для регулирования pH и его поддержания в колбах использовали фосфатный буферный раствор по методу, описанному в работе [10].

Для определения границ варьирования двух выбранных факторов – концентрации NaCl и уровня pH, провели эксперимент с варьированием каждого из факторов отдельно. Концентрация соли NaCl изменялась в пределах значений 0–12%, pH – 4,7–9,1. Засев инокулята осуществлялся в объеме 10%, среды были приготовлены в колбах Эрленмейера объемом 750 мл с рабочим объемом 50 мл.

Для разработки дизайна двухфакторного эксперимента использовали программное обеспечение Modde. Параметры планируемого эксперимента установлены с учетом определенных ранее границ варьирования. Значения полученных в программе параметров для проведения полного факторного эксперимента указаны ниже в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметров для проведения двухфакторного эксперимента
Table 1. Parameters' value for two-factor experiment

Эксперимент	Значение pH	Концентрация NaCl, %
1	5,5	0
2	5,5	2
3	5,5	4
4	7,3	0
5	7,3	2
6	7,3	4
7	9,1	0
8	9,1	2
9	9,1	4
10	7,3	2
11	7,3	2
12	7,3	2

Для подтверждения прогнозируемых данных, полученных с помощью математической модели на основе полного факторного эксперимента, а также для анализа эффективности оптимизации провели два процесса культивирования в биореакторе BIOSTAT A объемом 1 дм³ методом периодического глубинного культивирования без подпитки с контролем растворенного кислорода, температуры и значения pH. Параметры контролируемых показателей, установленные при культивировании, представлены в таблице 2. Регулирование уровня pH осуществляли с помощью растворов NaOH (1M) и H₃PO₄ (1M) в автоматическом режиме. В процессе культивирования каждые три часа отбирали пробы, в дальнейшем в образцах анализировали накопление биомассы и прирост количества пигмента.

Таблица 2. Контролируемые показатели при культивировании в биореакторе
Table 2. Values of controlled parameters during cultivation in a bioreactor

Контролируемый показатель		Установленное значение
pH	стандартный	7,0
	оптимизированный	8,5
температура, °C		28
об/мин		150–600
дм ³ /мин		0–2500
pO ₂ , %		30

Стандартное культивирование проводили на стандартной питательной среде, оптимизированное – на питательной среде с полученными в результате построения математической модели на основе полного факторного эксперимента параметрами – концентрация NaCl 0% и уровень pH 8,5.

Статистическая обработка, расчет параметров культивирования и графики распределения или накопления биомассы построены с помощью программы GraphPad Prism 10.

Результаты и обсуждение

В результате двух линейных экспериментов с независимым варьированием параметров концентрации NaCl и уровня pH получили представленные на графиках 1 и 2 данные, отображающие уровень накопления пигмента при заданных условиях.

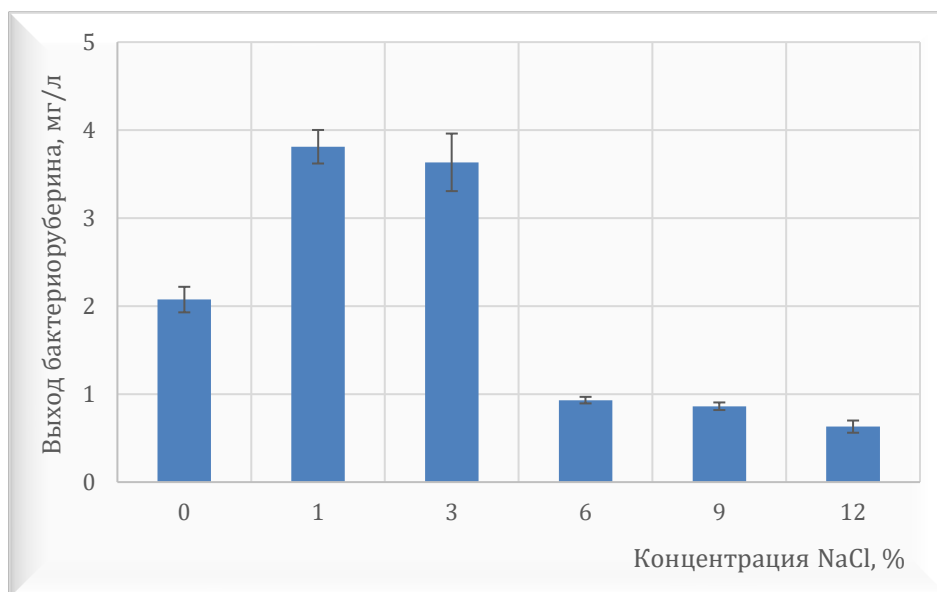


Рисунок 1 – Содержание каротиноида в зависимости от концентрации NaCl в питательной среде
Figure 1. Carotenoid content depending on NaCl concentration in the nutrient medium

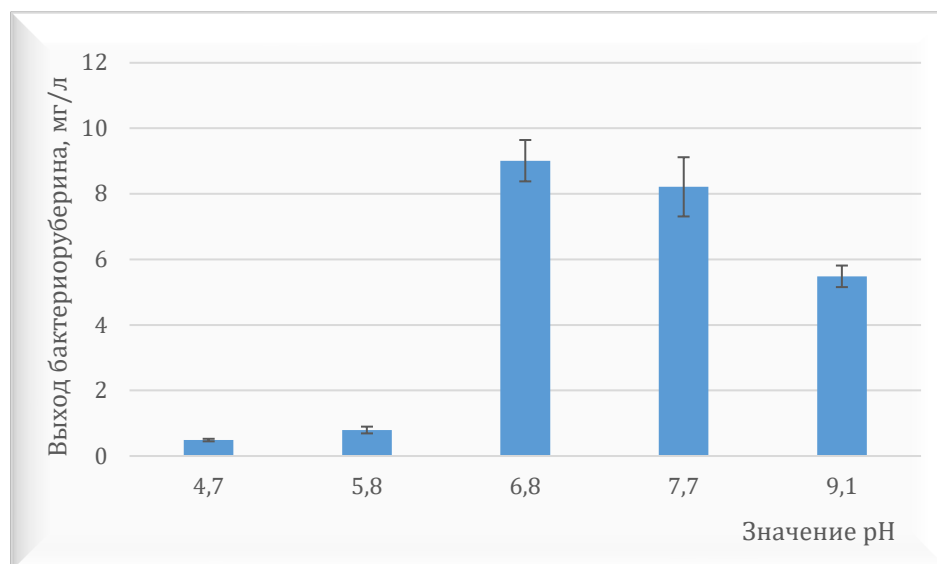


Рисунок 2 – Содержание каротиноида в зависимости от pH
Figure 2. Carotenoid content depending on pH

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что накопление пигмента происходило даже при концентрации NaCl в питательной среде 9%, что подтверждают литературные данные о высокой жизнеспособности бактерий рода *Arthrobacter* в экстремальных условиях [11]. Однако при таком значении параметра накопление незначительно, что позволило установить границы варьирования концентрации NaCl в рамках от 0 до 4%.

При проведении серии экспериментов с варьированием уровня рН обнаружено полное подавление процесса накопления бактериоруберина в кислой среде и стабильное сохранение интенсивности процесса накопления каротиноида в щелочной среде. Более того, бактерии в ходе культивирования без контроля уровня рН имели тенденцию к защелачиванию среды. Согласно литературным данным, щелочная среда негативно влияет на липидные мембраны бактерии, повышая их текучесть [12], а вследствие этого и проницаемость клетки, что провоцирует потерю необходимых нутриентов и уязвимость перед внешними факторами среды [13]. Однако одной из многочисленных защитных функций каротиноидов является снижение текучести биологических мембран за счет фиксации липидов, что в свою очередь повышает выживаемость продуцентов каротиноидов в экстремально щелочных средах [14]. Соответственно границы варьирования уровня рН были установлены в рамках от 5,5 до 9,1 для более глубокого исследования влияния щелочной среды на выработку каротиноидов.

В рамках установленных значений с варьированием обоих факторов получены следующие данные в результате полного факторного эксперимента, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Данные выхода каротиноида при проведении полного факторного эксперимента
Table 3. Carotenoid yield from a full factorial experiment

Эксперимент	Значение рН	Концентрация NaCl, %	Выход каротиноида, мг/дм ³
1	5,5	0	2,4
2	5,5	2	1,4
3	5,5	4	1,6
4	7,3	0	22,2
5	7,3	2	7,3
6	7,3	4	9,4
7	9,1	0	9,5
8	9,1	2	3,2
9	9,1	4	2,1
10	7,3	2	8,3
11	7,3	2	6,9
12	7,3	2	7,4

На основании представленных данных построен трехмерный график (рисунок 3), согласно которому синергическое взаимодействие факторов «отсутствия соли» и «щелочной рН» способствует максимальному выходу каротиноидов, достигающему 20 мг/дм³ при оптимальных параметрах культивирования (рН ≈ 8,5; NaCl 0%).

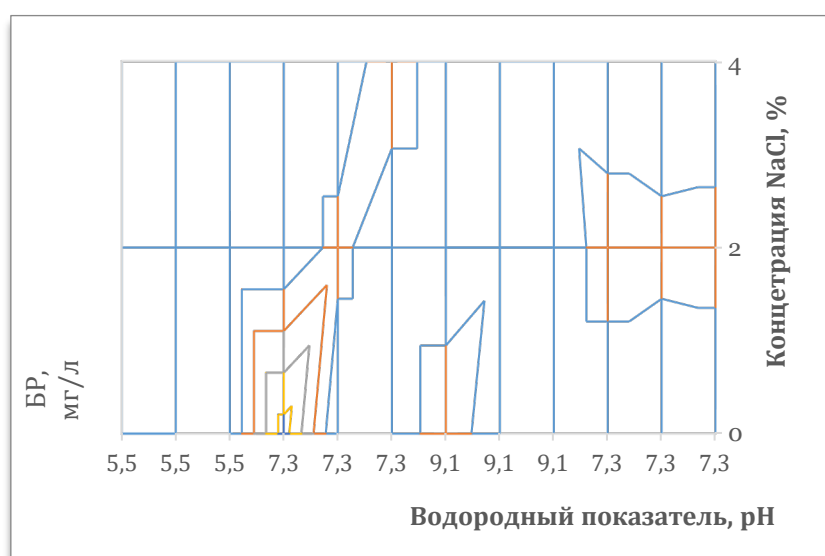


Рисунок 3 – Трехмерный график, описывающий влияние факторов на биосинтез бактериоруберина культурой *A. agilis* wb28

Figure 3. Three-dimensional graph describing the influence of factors on the biosynthesis of bacteriorubin by *A. agilis* wb28

Стандартные условия (рН 7; NaCl 1%) обеспечивали значительно меньшую продуктивность — около 12 мг/дм³. Повышенный выход обусловлен отсутствием негативного влияния соли на рост биомассы и стимулирующим эффектом щелочной среды, активирующей синтез бактериоруберина.

В результате культивирования в биореакторе BIOSTAT А проанализированы серии проб, отобранных во время биотехнологического процесса, с использованием стандартной и оптимизированной среды. Сравнительные данные культивирования представлены на графиках 4 и 5.

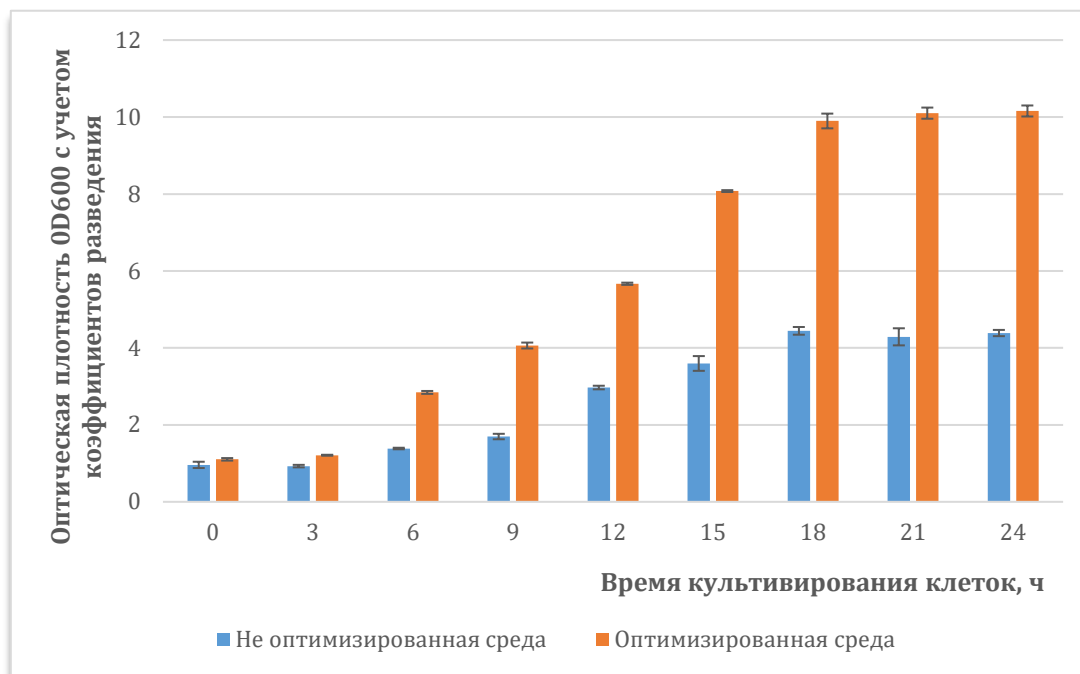


Рисунок 4 – Сравнительная диаграмма накопления биомассы при культивировании *Arthrobacter agilis* в биореакторе на оптимизированной и неоптимизированной средах

Figure 4. Comparative diagram of biomass accumulation during cultivation of *Arthrobacter agilis* in a bioreactor on optimised and non-optimised media



Рисунок 5 – Сравнительная диаграмма накопления бактериоруберина при культивировании *A. agilis* в биореакторе на оптимизированной и неоптимизированной средах

Figure 5. Comparative diagram of bacterioruberin accumulation during cultivation of *Arthrobacter agilis* in a bioreactor on optimised and non-optimised media

Анализируя график накопления биомассы, выявили тенденцию к ее продуктивному приросту на стандартной среде. Она способствует интенсивному накоплению биомассы, бактерии не испытывают воздействия стрессовых факторов и к 18 часу вступают в стационарную фазу с показателем оптической плотности (OD) порядка 10. При использовании оптимизированной среды так же наблюдался выход в стационарную фазу к 18 часу с показателем оптической плотности около 4, уровень накопления биомассы значительно уступал в сравнении со стандартной средой. Это связано с агрессивными внешними факторами – pH на уровне 8,5. Биологически активное состояние мембраны представляет собой ламеллярный жидкокристаллический (L α) бислоем. Фосфолипиды расположены так, что их полярные головки обращены наружу, а липидные ацильные цепи – внутрь бислоя. Любой внешний фактор, воздействующий на цитоплазматическую мембрану, вызывает изменения в свойствах липидов, которые, если они носят негативный характер, приводят к адаптивной реакции бактерий [13]. В данной ситуации внешним фактором выступает агрессивно щелочной уровень pH, а адаптивной реакцией, как можно наблюдать на диаграмме накопления каротиноида, – выделение бактериоруберина. Имея в своей структуре полярные функциональные группы [15], он фиксирует липидный слой мембраны бактерий, повышая их устойчивость к агрессивным условиям среды.

При сравнении накопления каротиноида (рисунок 5) наблюдался адаптационный период культуры: выработка каротиноида на стандартной среде превышала выработку на оптимизированной. Однако именно с 18-го часа, с началом стационарной фазы, происходила интенсификация процесса накопления каротиноида на оптимизированной среде, которая установилась на уровне около 10 мг/л и имела тенденцию к возрастанию по истечении 24 ч. Накопление каротиноида на стандартной среде к 18-му часу прекращалось, достигнув показателя 7,5 мг/л. Это связано с отсутствием агрессивных факторов внешней среды и соответственно с отсутствием необходимости воздействия защитных функций каротиноидов. На оптимизированной среде же наоборот – наиболее активная фаза начиналась по окончании экспоненциальной фазы, что свидетельствует об обеспечении выживаемости за счет накопления бактериоруберина. Активная фаза накопления предполагает адаптацию бактерий к агрессивным условиям и попытку нормализовать жизнедеятельность. Во многих каротинообразующих культурах более активное накопление каротиноида происходит в поздней логарифмической, либо в стационарной фазе [16], так как популяция уже накопила достаточное количество питательных веществ и нарастила объемы биомассы, оставшиеся ресурсы могут пойти на выработку вторичных метаболитов, которыми являются в том числе каротиноиды. Именно путем точечного воздействия агрессивными факторами на популяцию бактерий возможно направить метаболизм на продуцирование защитного каротиноида. В связи с этим во многих биотехнологических процессах производства пигментов используется многоэтапное культивирование, позволяющее накопить большое количество биомассы в благоприятных условиях, а далее подвергать бактерии стрессу для интенсификации систем защиты, например трехэтапное культивирование микроорганизмов *Chromochloris zofingiensis* дало положительные результаты [17].

Для лучшей наглядности эффекта оптимизации получены параметры кривых накопления, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Параметры графика накопления бактериоруберина при использовании различных сред
Table 4. Parameters of the bacteriocin accumulation graph when using different media

Параметр	Стандартная среда LB (pH 7,0/NaCl 1%)	Оптимизированная среда LB (pH 8,5/NaCl 0%)
УМ, мг/дм ³ (максимальное накопление)	7,643	14,22
k (константа скорости)	0,26	0,1337
X _{int} (пересечение с осью X)	3,846	7,479
QC, мг/дм ³ /ч (продуктивность процесса)	0,318	0,593
td (время удвоения)	2,67	5,18

Полученные значения отражают ранее сделанные выводы об использовании стандартной и оптимизированной среды. Максимальное накопление бактериоруберина на оптимизированной среде превышает показатели на стандартной среде почти в два раза, что говорит об успешной оптимизации. Однако константа скорости накопления пигмента на оптимизированной среде меньше,

чем на стандартной, что отражено в графиках – интенсификация процесса накопления каротиноида на оптимизированной среде начинается только к 18 часу, в то время как в стандартной среде к этому же часу произошло незначительное накопление. Закономерно время удвоения на стандартной среде в два раза меньше, что говорит о быстром развитии популяции. Несмотря на приостановление биотехнологического процесса до выхода накопления пигмента на оптимизированной среде в стационарную фазу и отсутствие данных о максимально возможном накоплении каротиноида, наблюдается превосходящее значение продуктивности процесса на оптимизированной среде на 86%, что свидетельствует о корректно проведенной оптимизации.

Заключение

В ходе исследования оптимизации условий культивирования *A. agilis* по двум факторам (концентрация NaCl и уровень pH), проведенного методом полного факторного эксперимента, выявлены оптимальные значения pH = 8,5 и NaCl = 0% с учетом способности штамма к защелачиванию среды.

Культивирование в биореакторе показало увеличение длительности экспоненциальной фазы в оптимизированных условиях, приводящее к снижению постоянной скорости накопления каротиноида, но обеспечивающее повышение общего уровня накопления на 33% к концу культивирования (24 ч).

Расчет параметров накопления подтвердил эффективность оптимизации: продуктивность синтеза каротиноида увеличилась с 0,318 мг/дм³·ч на стандартной среде до 0,593 мг/дм³·ч в оптимизированных условиях (+86%). Таким образом, достигнуто значительное улучшение показателей биотехнологического процесса.

Литература/References

1. Palanisamy M., Ramalingam S. Microbial bacterioruberin: A comprehensive review. *Indian Journal of Microbiology*. 2024, V. 64, pp. 1477–1501. DOI: 10.1007/s12088-024-01312-8
2. Hou J., Cui H.-L. In vitro antioxidant, antihemolytic, and anticancer activity of the carotenoids from halophilic archaea. *Curr Microbiol*. 2018, V. 75, no. 3, pp. 266–271. DOI: 10.1007/s00284-017-1374-z
3. Martínez-Espinosa R.M. Bacterioruberin (C50 carotenoid): Nutritional and biomedical potential of a microbial pigment. *Nutrients*. 2025, V. 17, no. 24, article 3899. DOI: 10.3390/nu17243899
4. Ma Y., Sun Z., Yang H., Xie W., Song M., Zhang B., Sui L. The biosynthesis mechanism of bacterioruberin in halophilic archaea revealed by genome and transcriptome analysis. *Appl Environ Microbiol*. 2024, V. 90, no. 7, article e00540-24. DOI: 10.1128/aem.00540-24
5. Flores N., Hoyos S., Venegas M., Galetović A. et al. Haloterrigena sp. strain SGH1, a bacterioruberin-rich, perchlorate-tolerant halophilic archaeon isolated from halite microbial communities, Atacama Desert, Chile. *Front Microbiol*. 2020, V. 11, article 24 DOI: 10.3389/fmicb.2020.00324
6. Cho E.-S., Hwang C. Y., Seo M.-J. Optimized production of bacterioruberin from "Haloferax marinum" using one-factor-at-a-time and central composite design approaches. *Bioresour Bioprocess*. 2024, V. 11, no. 1, article 111. DOI: 10.1186/s40643-024-00834-9
7. Noby N., Khatlab S.N., Soliman N.A. Sustainable production of bacterioruberin carotenoid and its derivatives from *Arthrobacter agilis* NP20 on whey-based medium: optimization and product characterization. *Bioresour. Bioprocess*. 2023, V. 10, no. 1, article 46. DOI: 10.1186/s40643-023-00662-3
8. Fong N.J., Burgess M.L., Barrow K.D., Glenn D.R. Carotenoid accumulation in the psychrotrophic bacterium *Arthrobacter agilis* in response to thermal and salt stress. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2001, V. 56, no. 5, pp. 750–756. DOI: 10.1007/s002530100739
9. Sharova N.Yu., Prichepa A.O., Sverdlova O.P., Printseva A.A. Adaptive properties of *Arthrobacter agilis* strain wb28 isolated from wheat bran. *Microbiology*. 2023. T. 92, № 5. С. 666–674. DOI: 10.1134/S0026261723600684
10. Okunowo W., Ogunkanmi A. Effects of sodium ion and water hyacinth extract in the production of *Curvularia pallescens* in culture media. *Afr J Biochem Res*. 2009, V. 3, no. 5, pp. 238–244.
11. Dsouza M., Taylor M.W., Turner S.J., Aislabie J. Genomic and phenotypic insights into the ecology of *Arthrobacter* from Antarctic soils. *BMC Genomics*. 2015, V. 16, no. 1, article 36. DOI: 10.1186/s12864-015-1220-2
12. Jeong J.H., Choi J.-H., Kim M.Ch., Park J.H. et al. Elucidating how bamboo salt interacts with supported lipid membranes: Influence of alkalinity on membrane fluidity. *Eur Biophys J*. 2015, V. 44, no. 5, pp. 383–391. DOI: 10.1007/s00249-015-1043-8
13. Mykytczuk N.C.S., Trevors J.T., Leduc L.G., Ferroni G.D. Fluorescence polarization in studies of bacterial cytoplasmic membrane fluidity under environmental stress. *Prog Biophys Mol Biol*. 2007, V. 95, no. 1–3, pp. 60–82. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2007.05.001
14. Gruszecki W.I., Strzalka K. Carotenoids as modulators of lipid membrane physical properties. *Biochim Biophys Acta*. 2005, V. 1740, no. 2, pp. 108–115. DOI: 10.1016/j.bbadis.2004.11.015

15. Giani M., Pire C., Martínez-Espinosa R.M. Bacterioruberin: Biosynthesis, antioxidant activity, and therapeutic applications in cancer and immune pathologies. *Mar Drugs*. 2024, V. 22, no. 4, article 167. DOI: 10.3390/md22040167
16. Giani M., Montero-Lobato Z., Garbayo I. et al. *Haloferax mediterranei* Cells as C50 carotenoid factories. *Mar Drugs*. 2021, V. 19, no. 2, article 100. DOI: 10.3390/md19020100
17. Bleisch R., Ihadjadene Y., Torrisi A., Walther T. et al. Physiological adaptation of *Chromochloris zofingiensis* in three-phased cultivation performed in a pilot-scale photobioreactor. *Life (Basel)*. 2025, V. 15, no. 4, article 648. DOI: 10.3390/life15040648

Информация об авторах

Екатерина Юрьевна Иванова – лаборант-исследователь

Артем Олегович Причепка – лаборант-исследователь

Габдулла Фаритович Курбанов – аспирант факультета биотехнологий, лаборант-исследователь

Наталья Юрьевна Шарова – д-р техн. наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе

Information about the authors

Ekaterina Yu. Ivanova, Research Assistant

Artem O. Prichepa, Research Assistant

Gabdulla F. Kurbanov, Postgraduate Student, Faculty of Biotechnology, Research Assistant

Natalya Yu. Sharova, D. Sci. (Eng.), Professor of the RAS, Deputy Director for Research

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 26.01.2026

Одобрена после рецензирования 27.02.2026

Принята к публикации 02.03.2026

The article was submitted 26.01.2026

Approved after reviewing 27.02.2026

Accepted for publication 02.03.2026