

УДК 579.2

Изучение биотехнологического потенциала штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103

А. П. Никифорова*, И. С. Хамагаева

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия;
e-mail: anna.p.nikiforova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3003-8638>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
06.07.2021;

получена
после доработки
30.08.2021

Ключевые слова:

молочнокислые
бактерии,
Lactobacillus sakei,
биотехнологический
потенциал,
пробиотические
свойства

Молочнокислые микроорганизмы играют важную роль при производстве продуктов питания. В этой связи в пищевой промышленности нашли широкое применение бактериальные культуры, обладающие комплексом характеристик, обеспечивающих стабильное протекание производственного процесса. В работе изучены биотехнологические свойства *Lactobacillus sakei* LSK-103. Отмечена высокая биохимическая активность данного штамма при культивировании на питательной среде MRS. Установлено, что через 16 часов культивирования в конце экспоненциальной фазы роста количество жизнеспособных клеток бактерий достигает 10^9 КОЕ/см³. При исследовании влияния различных концентраций хлорида натрия на накопление биомассы выявлено, что *Lactobacillus sakei* LSK-103 характеризуется высокой устойчивостью к соли. При повышении концентрации от 2 до 10 % выживаемость клеток находится в пределах 96,8–91,2 %, а их количество снижается незначительно и составляет 10^8 КОЕ/см³. Морфологические исследования свидетельствуют о том, что повышение концентрации хлорида натрия в среде сопровождается когезией клеток, образованием клеточных конгломератов, что интенсифицирует межклеточные контакты и повышает устойчивость *Lactobacillus sakei* LSK-103 к осмотическому стрессу. Установлена высокая выживаемость штамма при воздействии желчи, фенола, высоких (pH 8,3) и низких (pH 3,5) значениях активной кислотности среды, имитирующих условия в желудочно-кишечном тракте, что свидетельствует о пробиотических свойствах *Lactobacillus sakei*. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что штамм *Lactobacillus sakei* LSK-103 обладает высоким биотехнологическим потенциалом и может применяться в составе бактериальных препаратов для производства ферментированных рыбных продуктов.

Для цитирования

Никифорова А. П. и др. Изучение биотехнологического потенциала штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 3. С. 277–286. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-3-277-286>.

The study of biotechnological potential of *Lactobacillus sakei* LSK-103

Anna P. Nikiforova*, Irina S. Khamagaeva

*East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia;
e-mail: anna.p.nikiforova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3003-8638>

Article info

Received
06.07.2021;
received
in revised form
30.08.2021

Key words:

lactic acid bacteria,
Lactobacillus sakei,
biotechnological
potential,
probiotic properties

Abstract

Lactic acid bacteria play an important role in the production of food. Bacterial cultures widely used in the food industry often have a set of characteristics that ensure the stability of the production. The biotechnological properties of *Lactobacillus sakei* LSK-103 have been studied in the present work. *Lactobacillus sakei* LSK-103 has shown high biochemical activity on MRS medium. It has been found that after 16 h of cultivation at the end of the exponential growth phase, the number of viable bacterial cells reaches 10^9 CFU/cm³. The study of the effect of different concentrations of sodium chloride on biomass accumulation has shown that *Lactobacillus sakei* LSK-103 is highly resistant to salt. Increase in NaCl concentration from 2 to 10 % leads to decrease in cell survival from 96.8 to 91.2 %, and in number of bacteria to 10^8 CFU/cm³. Morphological studies indicate that an increase in the concentration of sodium chloride in the medium is accompanied by cell cohesion, the formation of cell conglomerates. Cohesion intensifies intercellular contacts and increases the resistance of *Lactobacillus sakei* LSK-103 to osmotic stress. The high survival rate of *Lactobacillus sakei* LSK-103 has been shown in the presence of bile, phenol (0.4 %), high (pH 8.3) and low (pH 3.5) values of active acidity of the medium indicating its probiotic properties. The results of research have shown that the *Lactobacillus sakei* LSK-103 has high biotechnological potential and can be used as part of bacterial preparations for the production of fermented fish products.

For citation

Nikiforova, A. P. et al. 2021. The study of biotechnological potential of *Lactobacillus sakei* LSK-103. *Vestnik of MSTU*, 24(3), pp. 277–286. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-3-277-286>.

Введение

В последние годы ассортимент ферментированных продуктов питания значительно увеличился. Они имеют уникальные органолептические характеристики, также известно, что употребление ферментированных продуктов связано с многочисленными преимуществами для здоровья. При производстве ферментированных продуктов часто применяются молочнокислые бактерии, роль которых заключается в формировании качества готового продукта, в том числе вкуса и аромата, повышении безопасности за счет антагонистической активности против патогенных микроорганизмов.

Ферментированные рыбные продукты традиционно производятся во многих странах мира. Для них характерны уникальный вкус и аромат. Считается, что при производстве ферментированных рыбных продуктов при формировании характерных органолептических свойств важную роль играют не только ферменты, но и микроорганизмы (*Skåra et al., 2015*). Большой научный интерес имеет применение бактериальных культур при производстве рыбных продуктов, что позволяет сделать процесс производства более управляемым, сократить продолжительность ферментации, улучшить характеристики продукта (*Speranza et al., 2015*).

В связи с этим разрабатываются бактериальные препараты, содержащие молочнокислые микроорганизмы, которые могут применяться для производства пищевых продуктов. Этому вопросу посвящены исследования российских и зарубежных ученых (*Speranza et al., 2015; Tsuda et al., 2012; Занданова и др., 2019; Китаевская и др., 2014; Пономарева и др., 2017*). При этом особый научный интерес имеет изучение биотехнологического потенциала микроорганизмов, который отвечает за эффективность и надежность бактериальных препаратов. Ценность штаммов определяется способностью сохранять высокую биохимическую активность, зависящую от внешних факторов и от соотношения между биохимически активными и неактивными клетками в популяциях микроорганизмов (*Китаевская, 2012*).

Применяемые штаммы должны быть способны противостоять неблагоприятным условиям, которые возникают при производстве бактериальных препаратов, например, в процессе сушки и хранения (при сублимационной сушке и замораживании). Для пробиотических штаммов важной является способность выживать в пищеварительном тракте человека. Однако бактерии могут подвергаться воздействию стрессовых факторов не только при прохождении через пищеварительную систему, но и при производстве, в природных условиях, когда важна способность быстро реагировать на стресс (*van de Guchte et al., 2002*).

Так, многие бактерии развили системы чувствительности к стрессу и защиты от него. Это позволяет им противостоять суровым условиям и внезапным изменениям окружающей среды. Механизмы защиты от стресса у бактерий различны и зависят от многих факторов (*van de Guchte et al., 2002*).

Ответы на стресс у бактерий зависят от скоординированной экспрессии генов, которые влияют на различные клеточные процессы, такие как деление клеток, метаболизм ДНК, и другие. Интеграция этих стрессовых реакций осуществляется сетями регуляторов, которые позволяют клеткам бактерий реагировать на изменения условий окружающей среды (*van de Guchte et al., 2002*). Большое количество исследований посвящено изучению стрессовых реакций бактерий (*Boor, 2006; Ezraty et al., 2017; Hews et al., 2019*). Наиболее изученными являются механизмы защиты от неблагоприятных факторов таких штаммов, как *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis* (*van de Guchte et al., 2002*).

Ухудшение экологической ситуации, приводящее к снижению защитных сил организма человека и всплеску заболеваний, связанных с нарушением бактериального баланса в желудочно-кишечном тракте, обуславливает постоянный интерес к изучению адаптационных механизмов молочнокислых бактерий. Внимание исследователей к изучению способности молочнокислых бактерий переживать неблагоприятные условия вызвано как теоретическим интересом, так и необходимостью создания пищевых продуктов с жизнеспособными клетками пробиотических микроорганизмов, длительное время сохраняющими способность к пролиферации, а при попадании в желудочно-кишечный тракт быстро адаптирующимися и возобновляющими активный метаболизм (*Ishibashi et al., 2001; Голод и др., 2009*).

Способность молочнокислых бактерий противостоять различным неблагоприятным факторам была объектом изучения многих ученых (*Papadimitriou et al., 2016; van de Guchte et al., 2002*). Достаточно хорошо изучены реакции молочнокислых бактерий на низкие значения pH, высокие и низкие температуры культивирования.

Одним из перспективных для применения в пищевой промышленности видов молочнокислых бактерий являются бактерии вида *Lactobacillus sakei* (*Zagorec et al., 2017; Никифорова и др., 2019*).

Известно, что бактерии вида *Lactobacillus sakei* относятся к молочнокислым бактериям. Несмотря на это они считаются типично мясными штаммами (*Nyquist et al., 2011; Zagorec et al., 2017*). Это связано с тем, что многие штаммы этого вида способны к активному росту в мясных и рыбных продуктах. Эта особенность обусловлена способностью бактерий данного вида ферментировать рибозу, которая присутствует в сыром мясе. Кроме того, *Lactobacillus sakei* способны использовать альтернативные источники углерода, такие как нуклеозиды или N-ацетилнейраминовую кислоту, также присутствующие в мясе (*Zagorec et al., 2017*). Многие штаммы *Lactobacillus sakei* могут расти при низких положительных температурах и в присутствии поваренной соли (*Nyquist et al., 2011*).

Бактерии данного вида широко применяются при производстве ферментированных колбас (*Amadoro et al., 2015; Papamanoli et al., 2003; Zagorec et al., 2017*). Они присутствуют и играют важную роль в формировании желательных свойств ферментированных традиционных продуктов из рыбы (*Bjerke et al., 2019; Skåra et al., 2015*). Кроме мясных и рыбных продуктов они входят в состав естественной микрофлоры продуктов питания из растительного сырья, например, заквасок из гречихи и тефа, применяемых при производстве хлеба, квашеной капусты и кимчи (*Jung et al., 2014; Moroni et al., 2011*).

Бактерии *Lactobacillus sakei* имеют большой потенциал применения в качестве пробиотиков. Так, установлено, что пероральный прием препарата, содержащего как живые, так и термоинактивированные клетки штамма *Lactobacillus sakei* proBio-65, выделенного из кимчи, подавляют воспаление кожи при атопическом дерматите и активацию тучных клеток (*Kim et al., 2013*).

Целью данной работы является изучение биотехнологического потенциала штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на кафедре технологии молочных продуктов, товароведения и экспертизы товаров Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (ВСГУТУ).

Объектом исследования служил штамм молочнокислых бактерий *Lactobacillus sakei* LSK-103, полученный из фонда Национального биоресурсного центра – Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (НБЦ ВКПИМ) Государственного научно-исследовательского института генетики и селекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (ГосНИИгенетика).

Известно, что штамм *Lactobacillus sakei* LSK-103 был выделен из сыровяленых испанских колбас. В процессе ферментации он способен синтезировать молочную кислоту, аммиак, а также бактериоцины. Указанный штамм является антагонистом *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Salmonella typhimurium*. Культурально-морфологические особенности штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103: бактерии представляют собой грамположительные палочки с закругленными концами, располагающиеся поодиночке или цепочками по 3–4 клетки. Колонии мелкие, округлой формы, с ровными краями.

При проведении экспериментальных исследований молочнокислые бактерии культивировали на полужидкой среде MRS (De Man, Rogosa, Sharpe) (НПЦ "Биокомпас-С") и обезжиренном молоке при температуре 37 °С.

Для определения способности молочнокислых бактерий расти в присутствии хлорида натрия бактерии культивировали на среде с добавлением поваренной соли в различных концентрациях (0–10 %). Рост биомассы контролировали по оптической плотности.

Оптическую плотность (OD) определяли с применением спектрофотометра PD-303 (APEL, Япония) при длине волны 590 нм.

Толерантность бактерий к желчи определяли по методике, изложенной в работе (*Tsuda et al., 2012*), с небольшими изменениями. В соответствии с ней в питательную среду MRS с содержанием желчи 0, 20 и 40 % вносили инокулят изучаемого штамма бактерий. После инокуляции питательные среды инкубировали при температуре 37 °С в течение 24 часов. Затем проводили количественный учет жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий.

При изучении способности штамма выживать при различных значениях pH, pH питательной среды доводили до необходимого значения путем добавления 1М раствора соляной кислоты или 1М раствора гидроксида натрия.

Устойчивость изучаемого штамма к фенолу определяли после его культивирования в течение 24 часов при 37 °С в питательной среде с содержанием фенола 0,4 %.

Количественный учет молочнокислых микроорганизмов проводили методом предельных разведений на агаризованной среде MRS (НПЦ "Биокомпас-С", Россия).

Активную кислотность питательной среды определяли при использовании pH-метра "Анион-4100" (НПП "Инфраспек-Аналит", Россия), оснащенного комбинированным электродом ЭСК-10601/7.

Морфологические изменения клеток *Lactobacillus sakei* LSK-103 изучали с применением микроскопа "Микмед-6" (ЛМОМО, Россия). Для этого предварительно готовили препараты и окрашивали их по Граму.

Статистический анализ полученных результатов проводили при использовании стандартных функций программы Microsoft Excel 2010. При этом для каждой характеристики измерение проводили в двух повторностях, производили расчет среднего значения и ошибки средней величины. Нулевая гипотеза отклонялась при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований изучали биохимическую активность штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103 на полужидкой среде MRS при оптимальной температуре 37 °С. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Анализ представленных данных свидетельствует об активном росте *Lactobacillus sakei* LSK-103 на среде MRS. Через 16 часов культивирования в конце экспоненциальной фазы количество жизнеспособных клеток составляет 10^9 КОЕ/см³ и в дальнейшем в стационарной фазе роста остается на прежнем уровне. Рост культуры сопровождается образованием молочной кислоты, что приводит к снижению активной кислотности до значения, равного 4,28.

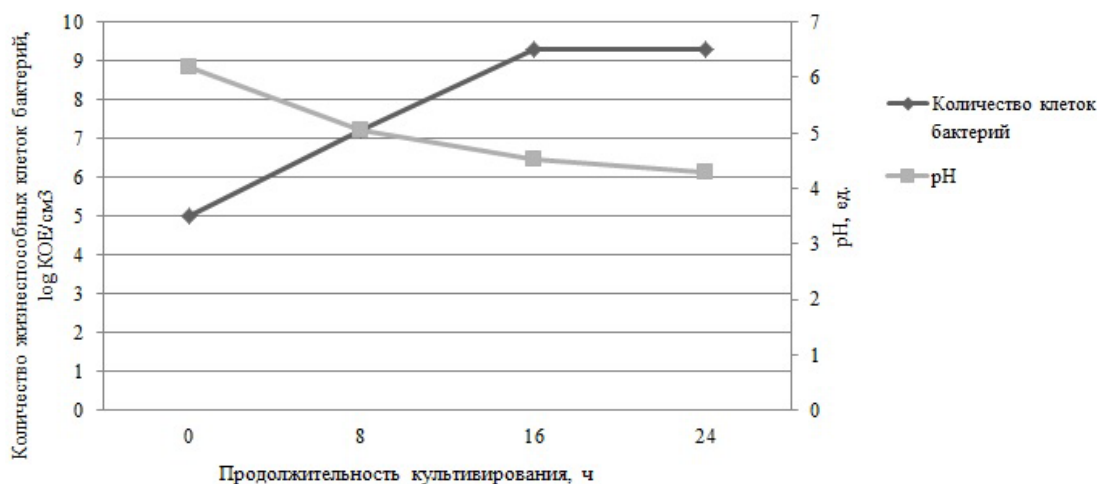


Рис. 1. Динамика численности клеток и активной кислотности при культивировании *Lactobacillus sakei* LSK-103 на полужидкой среде MRS
 Fig. 1. Changes in the number of *Lactobacillus sakei* LSK-103 cells and pH of the medium during cultivation on a semi-liquid MRS medium

Культивирование *Lactobacillus sakei* LSK-103 на молочной среде не привело к положительному результату. Вероятно, это связано с тем, что штамм не сбраживает лактозу. Полученные результаты согласуются с уже известными данными о том, что не все штаммы вида *Lactobacillus sakei* способны ферментировать лактозу (Amadoro et al., 2015; Obst et al., 1992). Так, только два из шести изучаемых в работе Amadoro et al. штаммов *Lactobacillus sakei* были способны ферментировать лактозу.

При разработке бактериального препарата, предназначенного для производства рыбных и мясных продуктов, следует принимать во внимание устойчивость применяемых штаммов бактерий к хлориду натрия. Известно, что массовая доля поваренной соли в соленой рыбе составляет от 4 до 13 %, а в мясных продуктах, например колбасах, зависит от вида колбас и составляет до 6 %. В связи с этим на втором этапе исследований изучали влияние хлорида натрия на рост молочнокислых бактерий.

Полученные в результате исследования данные об изменении оптической плотности питательной среды при культивировании представлены на рис. 2 и в таблице. Как показано на рис. 2, увеличение концентрации хлорида натрия в питательной среде сопровождается снижением оптической плотности, что свидетельствует об уменьшении прироста биомассы.

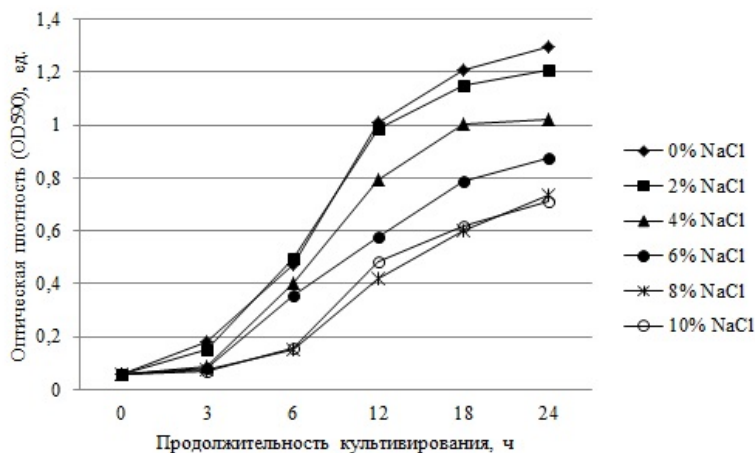


Рис. 2. Динамика изменения оптической плотности питательной среды в процессе культивирования *Lactobacillus sakei* LSK-103 в присутствии хлорида натрия
 Fig. 2. Changes in optical density (OD) of medium during cultivating *Lactobacillus sakei* LSK-103 in the presence of sodium chloride

Таблица. Выживаемость бактерий *Lactobacillus sakei* LSK-103 в присутствии хлорида натрия
 Table. Survival of *Lactobacillus sakei* LSK-103 in the presence of sodium chloride

| Характеристика | Концентрация хлорида натрия, % | | | | | |
|---|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Количество жизнеспособных клеток бактерий <i>Lactobacillus sakei</i> LSK-103 (КОЕ/см ³) | 2×10^9 | 1×10^9 | 9×10^8 | 6×10^8 | 3×10^8 | 3×10^8 |
| Выживаемость бактерий (%) | 100 | 96,8 | 96,2 | 94,4 | 91,2 | 91,2 |

Так, например, при концентрации хлорида натрия, равной 2 %, оптическая плотность снижается незначительно, а при 8–10 % NaCl наблюдается резкое снижение оптической плотности от 1,3 до 0,7, что приводит к замедлению накопления биомассы. Вместе с тем необходимо отметить высокую выживаемость клеток *Lactobacillus sakei* LSK-103, которая находится в пределах 96,8–91,2 % в зависимости от концентрации хлорида натрия. При этом отмечается достаточно высокая плотность популяции – 10^8 – 10^9 КОЕ/см³ (см. таблицу). На способность некоторых штаммов бактерий вида *Lactobacillus sakei* развиваться в присутствии высоких концентраций поваренной соли указано в работе (Amadoro et al., 2015).

В связи с этим в дальнейших исследованиях изучали морфологию клеток *Lactobacillus sakei* LSK-103 при различных концентрациях соли. Данные, представленные на рис. 3, показывают, что с увеличением концентрации соли наблюдается агрегация клеток с образованием клеточных конгломератов, включающих преимущественно палочковидные клетки, а также мультисептированные, ветвящиеся филаменты, которые обеспечивают межклеточное взаимодействие.

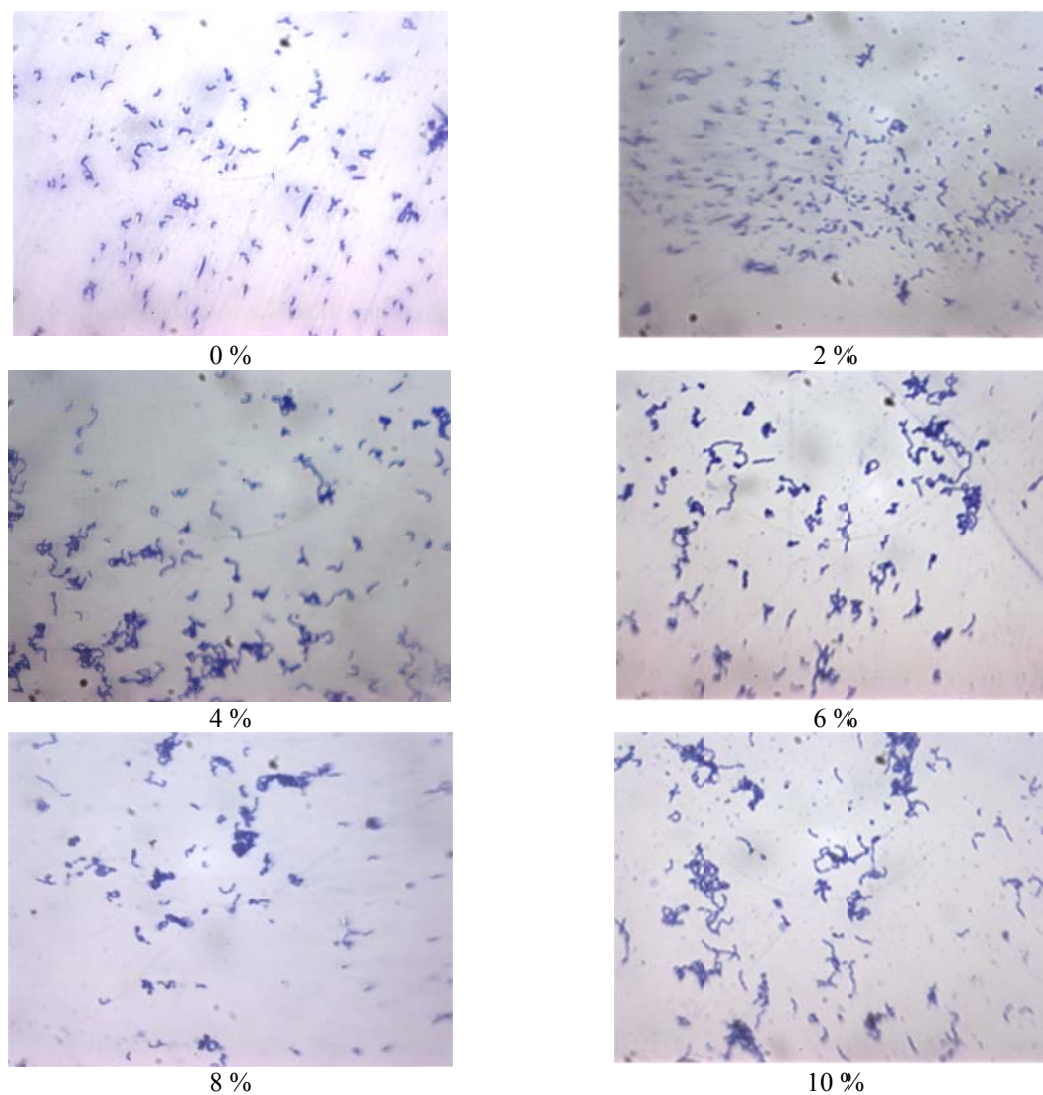


Рис. 3. Влияние различных концентраций хлорида натрия на морфологию бактерий *Lactobacillus sakei* LSK-103

Fig. 3. Effect of different concentrations of sodium chloride on morphology of bacteria *Lactobacillus sakei* LSK-103

С увеличением концентрации хлорида натрия интенсифицируются межклеточные контакты с образованием многоклеточных систем, что гарантирует адаптационную физиологическую устойчивость клеток к неблагоприятным факторам среды.

Одна из форм адаптации бактерий к неблагоприятным факторам среды – коллективное взаимодействие, разновидностью которого является когезия, т. е. слипание клеток одного клона или одной ткани (Олескин, 2009). Полученные в данном исследовании результаты подтверждают сведения о том, что присутствие в среде хлорида натрия может приводить к большей агрегации клеток бактерий (Li et al., 2020; Chowdhury et al., 2007).

В дальнейших исследованиях изучали пробиотические свойства *Lactobacillus sakei* LSK-103. Основные принципы тестирования пробиотической активности разработаны Всемирной организацией здравоохранения, согласно которым пробиотики должны быть устойчивы к воздействию желудочного сока и желчных кислот и выдерживать другие неблагоприятные факторы при прохождении через желудочно-кишечный тракт (Китаевская, 2012). Результаты исследований представлены на рис. 4.

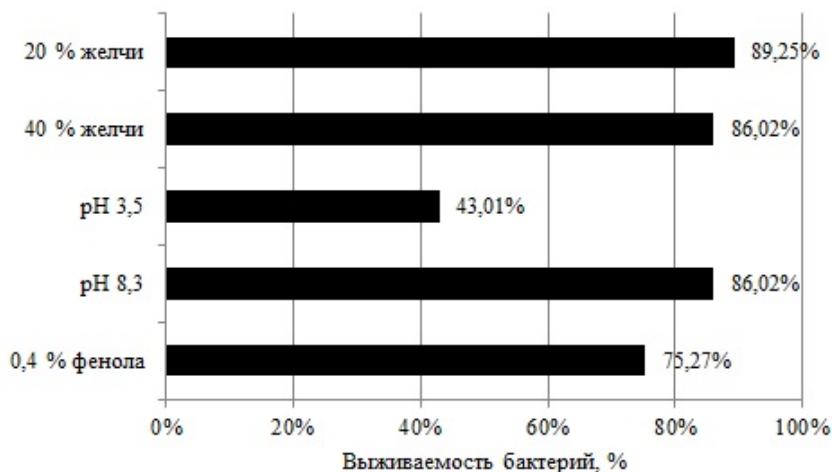


Рис. 4. Влияние желчи, pH и фенола на выживаемость бактерий *Lactobacillus sakei* LSK-103
 Fig. 4. Effect of bile, pH and phenol on survival of *Lactobacillus sakei* LSK-103

Из анализа представленных на рисунке данных видно, что *Lactobacillus sakei* LSK-103 характеризуется высокой устойчивостью к желчи и фенолу и растет в широком диапазоне pH, о чем свидетельствуют показатели выживаемости *Lactobacillus sakei* LSK-103, имитирующие условия желудочно-кишечного тракта. Кроме того, *Lactobacillus sakei* LSK-103 обладает антагонистической активностью в отношении широкого спектра условно-патогенных микроорганизмов.

Желчные кислоты в тонком кишечнике выполняют функцию эмульгирования и солюбилизации липидов. Их наличие критическим образом сказывается на микроорганизмах, мембраны которых состоят из липидов и жирных кислот (Tsuda et al., 2012). В результате полученных исследований установлено, что *Lactobacillus sakei* LSK-103 является устойчивым к содержанию в среде желчи. Выживаемость бактерий составляет 86,02 и 89,25 % при содержании в питательной среде 40 и 20 % желчи соответственно.

Механизмы защиты бактерий от высоких концентраций желчи различны. Например, известно, что штаммы, продуцирующие экзополисахариды, демонстрируют большую устойчивость к желчи и низким значениям pH. Другим механизмом, обеспечивающим защиту бактерий от желчи, является наличие ферментов – гидролаз желчных кислот (Bile salt hydrolase – BSH), которые могут деконъюгировать желчные кислоты, обеспечивая, таким образом, защиту от желчи (van de Guchte et al., 2002).

Установлено, что бактерии *Lactobacillus sakei* LSK-103 способны выживать в кислой среде при значении pH, равном 3,5 (выживаемость клеток бактерий – 43,01 %). Известно, что значение активной кислотности соляной кислоты в желудке составляет 0,9, но присутствие в нем пищи приводит к увеличению pH: считается, что значение pH в желудке человека составляет от 2,5 до 3,5 (Tsuda et al., 2012; Ulleberg et al., 2011).

Низкая кислотность среды также может вызывать молекулярные изменения на поверхности клеток бактерий. Бактерии способны изменять липидный состав своей мембраны в ответ на воздействующие на них стрессовые факторы. Это свойство обеспечивает толерантность бактерий к низкой кислотности среды и неблагоприятным температурам (van de Guchte et al., 2002).

Способность бактерий выживать в щелочной среде также является важным свойством в связи с тем, что значение pH секрета дуоденальных желез варьируется в пределах 5–8 (Ulleberg et al., 2011). При pH 8,3 выживаемость изучаемого штамма составляет 86,02 %. Исследованиями Sawatari и Yokota установлено, что максимальные значения pH, при которых возможен рост молочнокислых бактерий, демонстрируют высокую вариабельность. Эти значения во многом зависят от происхождения штамма (Sawatari et al., 2007).

В процессе пищеварения в кишечнике человека образуются токсичные продукты обмена белков, в том числе фенол, скатол, индол и другие, которые способны вызывать угнетение полезной микрофлоры (Smith et al., 1997; Кутаевская, 2012). Лишь устойчивые к фенолу (0,4–0,5 %) штаммы бактерий способны приживаться в желудочно-кишечном тракте. В этой связи при исследовании пробиотических свойств бактерий обычно изучается устойчивость к фенолу (Somashekaraiyah et al., 2019; Кутаевская, 2012). Данное исследование показало, что *Lactobacillus sakei* LSK-103 является достаточно устойчивым к фенолу (0,4 %): количество жизнеспособных клеток бактерий составило 10^7 КОЕ/см³, а выживаемость – 75,27 %.

Полученные в данной работе результаты демонстрируют, что в ответ на изменения окружающей среды, связанные с воздействием повреждающих факторов, микроорганизмы включают эволюционно выработанные и наследственно закрепленные механизмы адаптации, позволяющие популяции пережить неблагоприятные для роста условия.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что *Lactobacillus sakei* LSK-103 обладает достаточно высокой биохимической активностью и устойчивостью к неблагоприятным для роста условиям.

Полученные результаты демонстрируют гибкое реагирование *Lactobacillus sakei* LSK-103 на повышение концентрации хлорида натрия в питательной среде.

Отмечена высокая выживаемость *Lactobacillus sakei* LSK-103 при воздействии факторов, имитирующих условия в желудочно-кишечном тракте, что свидетельствует о его пробиотических свойствах.

Выявленные в настоящей работе закономерности роста *Lactobacillus sakei* LSK-103 при высоких концентрациях хлорида натрия открывают широкие перспективы для биотехнологической обработки рыбного сырья и создания ферментированных рыбных продуктов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (номер гранта МК-128.2020.11).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Голод Н. А., Лойко Н. Г., Мулюкин А. Л., Нейматов А. Л. [и др.]. Адаптация молочнокислых бактерий к неблагоприятным для роста условиям // Микробиология. 2009. Т. 78, № 3. С. 317–335.
- Занданова Т. Н., Хамагаева И. С. Бактериальный концентрат микробного консорциума // Молочная промышленность. 2019. № 12. С. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2019-12-22-24>.
- Китаевская С. В. Современные тенденции отбора и идентификации пробиотических штаммов молочнокислых бактерий // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 17. С. 184–188.
- Китаевская С. В., Пономарев В. Я. Роль молочнокислых бактерий в обеспечении биобезопасности ферментированных мясopодуков // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 21. С. 248–250.
- Никифорова А. П., Хазагаева С. Н., Артюхова С. И. Исследование биохимической активности штамма *Lactobacillus sakei* LSK-104 // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 4(75). С. 62–68.
- Олескин А. В. Биосоциальность одноклеточных (на материале исследований прокариот) // Журнал общей биологии. 2009. Т. 70, № 3. С. 225–238.
- Пономарева О. И., Борисова Е. В., Прохорчик И. П. Использование молочнокислых бактерий для приготовления кислых элей // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-2-13-17>.
- Amadoro C., Rossi F., Piccirilli M., Colavita G. Features of *Lactobacillus sakei* isolated from Italian sausages: Focus on strains from Venticina del Vastese // Italian Journal of Food Safety. 2015. Vol. 4, Iss. 4. P. 220–224. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijfs.2015.5449>.
- Bjerke G. A., Rudi K., Avershina E., Moen B. [et al.]. Exploring the brine microbiota of a traditional Norwegian fermented fish product (rakfisk) from six different producers during two consecutive seasonal productions // Foods. 2019. Vol. 8, Iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods8020072>.
- Boor K. J. Bacterial stress responses: What doesn't kill them can make them stronger // PLoS Biol. 2006. Vol. 4, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040023>.
- Chowdhury S. P., Nagarajan T., Tripathi R., Mishra M. N. [et al.]. Strain-specific salt tolerance and osmoregulatory mechanisms in *Azospirillum brasilense* // FEMS Microbiology Letters. 2007. Vol. 267, Iss. 1. P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00540.x>.
- Ezraty B., Gennaris A., Barras F., Collet J.-F. Oxidative stress, protein damage and repair in bacteria // Nature Reviews Microbiology. 2017. Vol. 15, Iss. 7. P. 385–396. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.26>.

- Hews C. L., Cho T., Rowley G., Raivio T. L. Maintaining integrity under stress: Envelope stress response regulation of pathogenesis in gram-negative bacteria // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2019. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2019.00313>.
- Ishibashi N., Yamazaki S. Probiotics and safety // *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2001. Vol. 73, Iss. 2. P. 465s–470s. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.465s>.
- Jung J. Y., Lee S. H., Jeon C. O. Kimchi microflora: History, current status, and perspectives for industrial kimchi production // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014. Vol. 98, Iss. 6. P. 2385–2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5513-1>.
- Kim J.-Y., Park B.-K., Park H.-J., Park Y.-H. [et al.]. Atopic dermatitis-mitigating effects of new *Lactobacillus* strain, *Lactobacillus sakei* probio 65 isolated from Kimchi // *Journal of Applied Microbiology*. 2013. Vol. 115, Iss. 2. P. 517–526. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.12229>.
- Li D., Liang X., Wu C. Characteristics of nitrogen removal and extracellular polymeric substances of a novel salt-tolerant denitrifying bacterium, *Pseudomonas* sp. DN-23 // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00335>.
- Moroni A. V., Arendt E. K., Dal Bello F. Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sour doughs // *Food Microbiology*. 2011. Vol. 28, Iss. 3. P. 497–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.10.016>.
- Nyquist O. L., McLeod A., Brede D. A., Snipen L. [et al.]. Comparative genomics of *Lactobacillus sakei* with emphasis on strains from meat // *Molecular Genetics and Genomics*. 2011. Vol. 285, Iss. 4. P. 297–311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00438-011-0608-1>.
- Obst M., Hehn R., Vogel R. F., Hammes W. P. Lactose metabolism in *Lactobacillus curvatus* and *Lactobacillus sake* // *FEMS Microbiology Letters*. 1992. Vol. 97, Iss. 3. P. 209–214. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1992.tb05465.x>.
- Papadimitriou K., Alegría Á., Bron P. A., de Angelis M. [et al.]. Stress physiology of lactic acid bacteria // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2016. Vol. 80, Iss. 3. P. 837–890. DOI: <https://doi.org/10.1128/mubr.00076-15>.
- Papamanoli E., Tzanetakis N., Litopoulou-Tzanetaki E., Kotzekidou P. Characterization of lactic acid bacteria isolated from a Greek dry-fermented sausage in respect of their technological and probiotic properties // *Meat Science*. 2003. Vol. 65, Iss. 2. P. 859–867. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00292-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00292-9).
- Sawatari Y., Yokota A. Diversity and mechanisms of alkali tolerance in *Lactobacilli* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73, Iss. 12. P. 3909–3915. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02834-06>.
- Skåra T., Axelsson L., Stefánsson G., Ekstrand B. [et al.]. Fermented and ripened fish products in the Northern European countries // *Journal of Ethnic Foods*. 2015. Vol. 2, Iss. 1. P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jef.2015.02.004>.
- Smith E. A., Macfarlane G. T. Formation of phenolic and indolic compounds by anaerobic bacteria in the human large intestine // *Microbial Ecology*. 1997. Vol. 33, Iss. 3. P. 180–188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002489900020>.
- Somashekaraiah R., Shruthi B., Deepthi B. V., Sreenivasa M. Y. Probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from Neera: A naturally fermenting coconut palm nectar // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01382>.
- Speranza B., Racioppo A., Bevilacqua A., Beneduce L. [et al.]. Selection of autochthonous strains as starter cultures for fermented fish products // *Journal of Food Science*. 2015. Vol. 80, Iss. 1. P. 151–160. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12721>.
- Tsuda H., Matsumoto T., Ishimi Y. Selection of lactic acid bacteria as starter cultures for fermented meat products // *Food Science and Technology Research*. 2012. Vol. 18, Iss. 5. P. 713–721. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.18.713>.
- Ulleberg E. K., Comi I., Holm H., Herud E. B. [et al.]. Human gastrointestinal juices intended for use in in vitro digestion models // *Food Digestion*. 2011. Vol. 2, Iss. 1–3. P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13228-011-0015-4>.
- van de Guchte M., Serror P., Chervaux C., Smokvina T. [et al.]. Stress responses in lactic acid bacteria // *Antonie van Leeuwenhoek*. 2002. Vol. 82. P. 187–216. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020631532202>.
- Zagorec M., Champomier-Vergès M.-C. *Lactobacillus sakei*: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products // *Microorganisms*. 2017. Vol. 5, Iss. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030056>.

References

- Golod, N. A., Loiko, N. G., Mulyukin, A. L., Neimatov, A. L. et al. 2009. Adaptation of lactic acid bacteria to unfavorable growth conditions. *Mikrobiologiya*, 78, pp. 317–335. (In Russ.)
- Zandanova, T. N., Khamagaeva, I. S. 2019. The bacterial concentrate of the microbial consortium. *Dairy Industry*, 2, pp. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2019-12-22-24>. (In Russ.)

- Kitaevskaya, S. V. 2012. Modern trends in the selection and identification of probiotic strains of lactic acid bacteria. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 15(17), pp. 184–188. (In Russ.)
- Kitaevskaya, S. V., Ponomarev, V. Ya. 2014. The role of lactic acid bacteria in ensuring the biosafety of fermented meat products. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 17(21), pp. 248–250. (In Russ.)
- Nikiforova, A. P., Khazagaeva, S. N., Artyukhova, S. I. 2019. Study of the biochemical activity of the *Lactobacillus sakei* strain LSK-104. *ESSUTM Bulletin*, 4(75), pp. 62–68. (In Russ.)
- Oleskin, A. V. 2009. Biosocial phenomena in unicellular organisms (exemplified by data concerning Prokaryota). *Biology Bulletin Reviews*, 70(3), pp. 225–238. (In Russ.)
- Ponomareva, O. I., Borisova, E. V., Prokhorchik, I. P. 2017. The use of lactic acid bacteria for the preparation of sour ales. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2, pp. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-2-13-17>. (In Russ.)
- Amadoro, C., Rossi, F., Piccirilli, M., Colavita, G. 2015. Features of *Lactobacillus sakei* isolated from Italian sausages: Focus on strains from Ventricina del Vastese. *Italian Journal of Food Safety*, 4(4), pp. 220–224. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijfs.2015.5449>.
- Bjerke, G. A., Rudi, K., Avershina, E., Moen, B. et al. 2019. Exploring the brine microbiota of a traditional norwegian fermented fish product (rakfisk) from six different producers during two consecutive seasonal productions. *Foods*, 8(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/foods8020072>.
- Boor, K. J. 2006. Bacterial stress responses: What doesn't kill them can make them stronger. *PLoS Biol.*, 4(1). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040023>.
- Chowdhury, S. P., Nagarajan, T., Tripathi, R., Mishra, M. N. et al. 2007. Strain-specific salt tolerance and osmoregulatory mechanisms in *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiology Letters*, 267(1), pp. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00540.x>.
- Ezraty, B., Gennaris, A., Barras, F., Collet, J.-F. 2017. Oxidative stress, protein damage and repair in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 15(7), pp. 385–396. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.26>.
- Hews, C. L., Cho, T., Rowley, G., Raivio, T. L. 2019. Maintaining integrity under stress: envelope stress response regulation of pathogenesis in gram-negative bacteria. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcimb.2019.00313>.
- Ishibashi, N., Yamazaki, S. 2001. Probiotics and safety. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 73(2), pp. 465s–470s. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.465s>.
- Jung, J. Y., Lee, S. H., Jeon, C. O. 2014. Kimchi microflora: History, current status, and perspectives for industrial kimchi production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(6), pp. 2385–2393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5513-1>.
- Kim, J.-Y., Park, B.-K., Park, H.-J., Park, Y.-H. et al. 2013. Atopic dermatitis-mitigating effects of new *Lactobacillus* strain, *Lactobacillus sakei* probio 65 isolated from Kimchi. *Journal of Applied Microbiology*, 115(2), pp. 517–526. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.12229>.
- Li, D., Liang, X., Wu, C. 2020. Characteristics of nitrogen removal and extracellular polymeric substances of a novel salt-tolerant denitrifying bacterium, *Pseudomonas* sp. DN-23. *Frontiers in Microbiology*, 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00335>.
- Moroni, A. V., Arendt, E. K., Dal Bello, F. 2011. Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sour doughs. *Food Microbiology*, 28(3), pp. 497–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.10.016>.
- Nyquist, O. L., McLeod, A., Brede, D. A., Snipen, L. et al. 2011. Comparative genomics of *Lactobacillus sakei* with emphasis on strains from meat. *Molecular Genetics and Genomics*, 285(4), pp. 297–311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00438-011-0608-1>.
- Obst, M., Hehn, R., Vogel, R. F., Hammes, W. P. 1992. Lactose metabolism in *Lactobacillus curvatus* and *Lactobacillus sakei*. *FEMS Microbiology Letters*, 97(3), pp. 209–214. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1992.tb05465.x>.
- Papadimitriou, K., Alegría, Á., Bron, P. A., de Angelis, M. et al. 2016. Stress physiology of lactic acid bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(3), pp. 837–890. DOI: <https://doi.org/10.1128/mmb.00076-15>.
- Papamanoli, E., Tzanetakis, N., Litopoulou-Tzanetaki, E., Kotzekidou, P. 2003. Characterization of lactic acid bacteria isolated from a Greek dry-fermented sausage in respect of their technological and probiotic properties. *Meat Science*, 65(2), pp. 859–867. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00292-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00292-9).
- Sawatari, Y., Yokota, A. 2007. Diversity and mechanisms of alkali tolerance in *Lactobacilli*. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), pp. 3909–3915. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02834-06>.
- Skåra, T., Axelsson, L., Stefánsson, G., Ekstrand, B. et al. 2015. Fermented and ripened fish products in the Northern European countries. *Journal of Ethnic Foods*, 2(1), pp. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jef.2015.02.004>.
- Smith, E. A., Macfarlane, G. T. 1997. Formation of phenolic and indolic compounds by anaerobic bacteria in the human large intestine. *Microbial Ecology*, 33(3), pp. 180–188. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002489900020>.

- Somashekaraiah, R., Shruthi, B., Deepthi, B. V., Sreenivasa, M. Y. 2019. Probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from Neera: A naturally fermenting coconut palm nectar. *Frontiers in Microbiology*, 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01382>.
- Speranza, B., Racioppo, A., Bevilacqua, A., Beneduce, L. et al. 2015. Selection of autochthonous strains as starter cultures for fermented fish products. *Journal of Food Science*, 80(1), pp. 151–160. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12721>.
- Tsuda, H., Matsumoto, T., Ishimi, Y. 2012. Selection of lactic acid bacteria as starter cultures for fermented meat products. *Food Science and Technology Research*, 18(5), pp. 713–721. DOI: <https://doi.org/10.3136/fstr.18.713>.
- Ulleberg, E. K., Comi, I., Holm, H., Herud, E. B. et al. 2011. Human gastrointestinal juices intended for use in in vitro digestion models. *Food Digestion*, 2(1–3), pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13228-011-0015-4>.
- van de Guchte, M., Serror, P., Chervaux, C., Smokvina, T. et al. 2002. Stress responses in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 82, pp. 187–216. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020631532202>.
- Zagorec, M., Champomier-Vergès, M.-C. 2017. *Lactobacillus sakei*: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products. *Microorganisms*, 5(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030056>.

Сведения об авторах

Никифорова Анна Платоновна – ул. Ключевская, 40в, стр. 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия, 670013; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: anna.p.nikiforova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3003-8638>

Anna P. Nikiforova – 40v, Building 1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Russia, 670013; East Siberia State University of Technology and Management, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher; e-mail: anna.p.nikiforova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3003-8638>

Хамагаева Ирина Сергеевна – ул. Ключевская, 40в, стр. 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия, 670013; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, д-р техн. наук, профессор; e-mail: ikhamagaeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>

Irina S. Khamagaeva – 40v, Building 1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Russia, 670013; East Siberia State University of Technology and Management, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: ikhamagaeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>