

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра органической и биоорганической химии

**Структура и свойства липополисахаридов штаммов бактерий рода *Enterobacter***

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

студент(ки) II курса 251 группы  
направления 04.04.01 – «Химия»

Института химии

Астанковой Анастасии Сергеевны

Научный руководитель  
доцент, к.б.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Г. Л. Бурыгин

Зав. кафедрой  
профессор, д.х.н., профессор

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А. Ю. Егорова

Саратов 2026

## Введение

**Актуальность и цель работы:** Бактерии рода *Enterobacter* — грамотрицательные бактерии, распространение в широком круге природных объектов — в водоемах, в почве, в насекомых, в кишечнике млекопитающих. Поскольку значительная часть актуальных исследований посвящена изучению представителей *Enterobacter* патогенных для человека изучение структуры и свойств неклинических штаммов фрагментарно. Присутствие неклинических *Enterobacter* может оказывать диаметрально противоположное влияние на среду своего обитания. Известно, что представители рода могут оказывать как положительное – рост стимулирующее воздействие, так и отрицательное – ингибирующее воздействие («бактерии гниения») на сельскохозяйственные культуры, находиться в симбиотических и паразитирующих отношениях с микробиомами желудочно-кишечного тракта млекопитающих. В связи с этим актуальной задачей является систематическое изучение структуры и свойств неклинических *Enterobacter* выделенных из различных природных источников (насекомых, почва и корневая система растений). Ключевым элементом наружной мембраны грамотрицательных бактерий являются липополисахариды (ЛПС).

Ввиду расположения на внешнем слое наружной мемbrane, ЛПС одни из первых компонентов бактерий, взаимодействующих с окружающей средой, и в значительной мере могут обуславливать возможные положительные или негативные свойства бактерий. Углеводная структура ЛПС чрезвычайно вариабельна и может быть представлена различным моносахаридным составом у штаммов даже одного вида. Таким образом, целью данной работы стало: выделение и изучение структуры и свойств ЛПС неклинических штаммов бактерии рода *Enterobacter*

В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выделить, очистить и сконцентрировать ЛПС из бактериальных клеточных культур;

2. Изучить состав ЛПС с использованием комбинации химических методов
3. Исследовать структуру и свойства ЛПС с использованием физико-химических методов анализа
4. Применить методы компьютерного моделирования для определения уникальности моносахаридного звена и геномного состава ЛПС
5. *In vitro* оценить влияние выделенных ЛПС на рост микрорастения *Solanum tuberosum L.* (картофель)

Научная новизна работы состоит в систематическом исследовании состава, структуры и свойств впервые полученных ЛПС из неклинических штаммов бактерии рода *Enterobacter*, а также впервые представлена новая структура моносахаридного звена О-полисахаридного кора ЛПС.

## Основное содержание работы

В работе использованы неклинические бактериальные штаммы рода *Enterobacter* представлены в таблице 1. Почвенные бактериальные культуры (278, 378) получены из коллекции микроорганизмов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической биологии и фундаментальной медицины им. Д.Г. Кнорре Сибирского отделения Российской академии наук[1], ризосферные бактерии клубеньков сои (R4,R12) — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова", бактерии, выделенные из кишечника личинок колорадского жука — Институт систематики и экологии животных Сибирского отделения Российской академии наук[2]

Далее для обозначения бактериальных штаммов использовали акронимы, указанные в таблице 1.

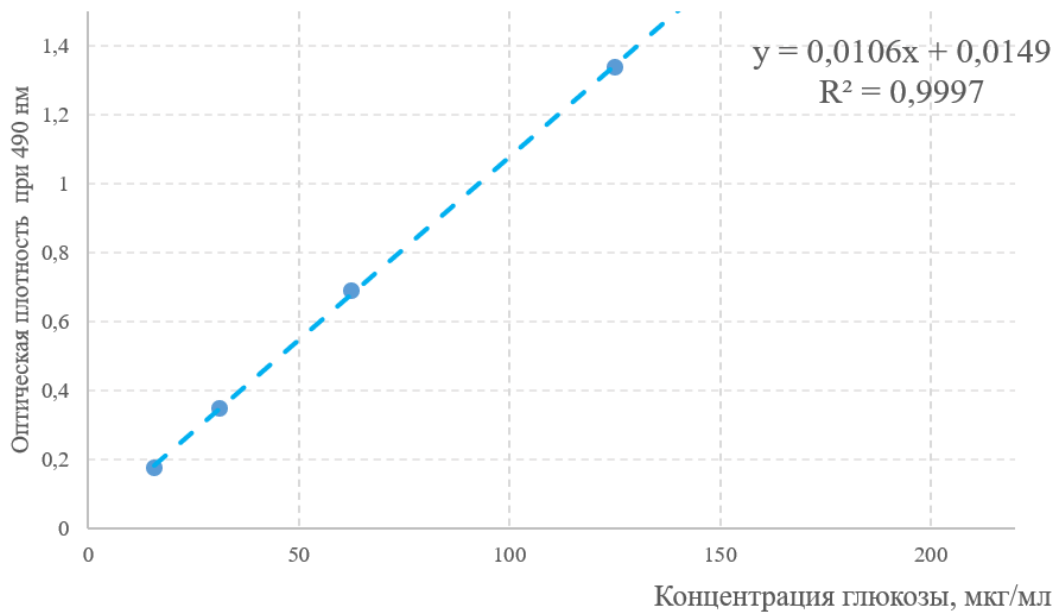
Таблица 1 — Акронимы и название филогенетически близкого штамма по тесту сравнения последовательности гена 16S р – РНК, а также культивированный объём и массы клеточных культур после осушения и полученных ЛПС.

<b>Акроним</b>	<b>Название филогенетически близкого штамма</b>	<b>V</b> объём культур, Л	<b>m</b> сух. клеток, Г	<b>m</b> ЛПС, МГ	<b>Выход, %</b>
<b>278</b>	<i>Enterobacter ludwigii</i> strain AF137-NN-B1	5	4,8	123	12,3
<b>378</b>	<i>Enterobacter ludwigii</i> strain AF-SC-P-D6.1	6	4,1	73	7,3
<b>21320</b>	<i>Enterobacter</i> <i>cancerogenus</i> ATCC BAA-2102 strain LF7	5	5,0	77	7,7
<b>R12</b>	<i>Enterobacter mori</i> strain GmNs1	6	5,0	120	12,0
<b>R4</b>	<i>Enterobacter ludwigii</i> strain R4	6	4,7	111	11,1

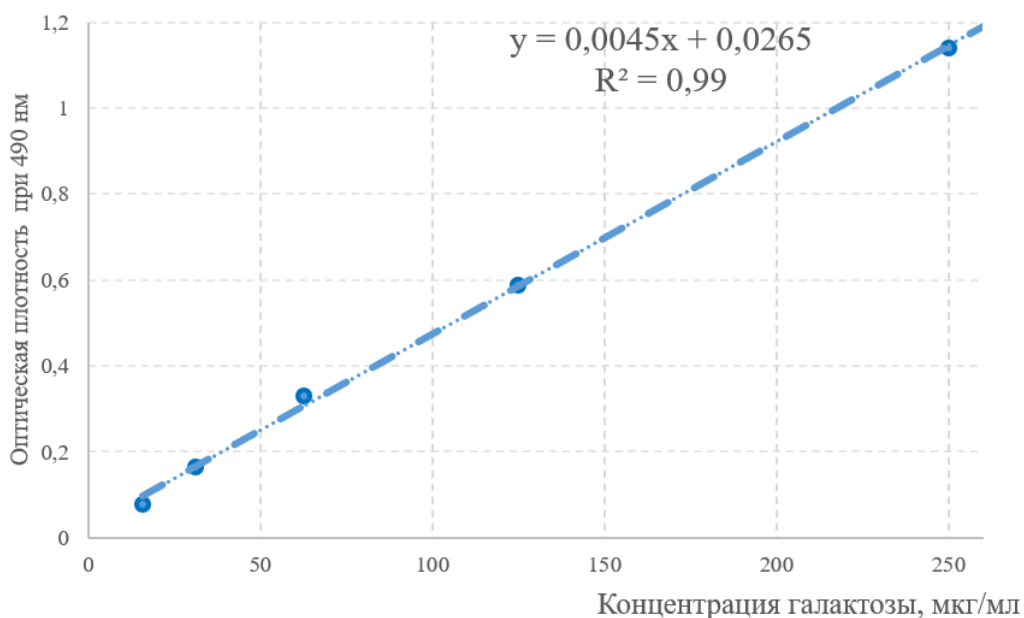
## Химическое изучение состава ЛПС

Химическое изучение состава ЛПС заключалось в определении содержания углеводов, фосфатов и КДО. Количественный анализ компонентов проводили с использованием метода градуировочного графика. Градуировочные графики представлены на рисунке 5.

**А**



**Б**



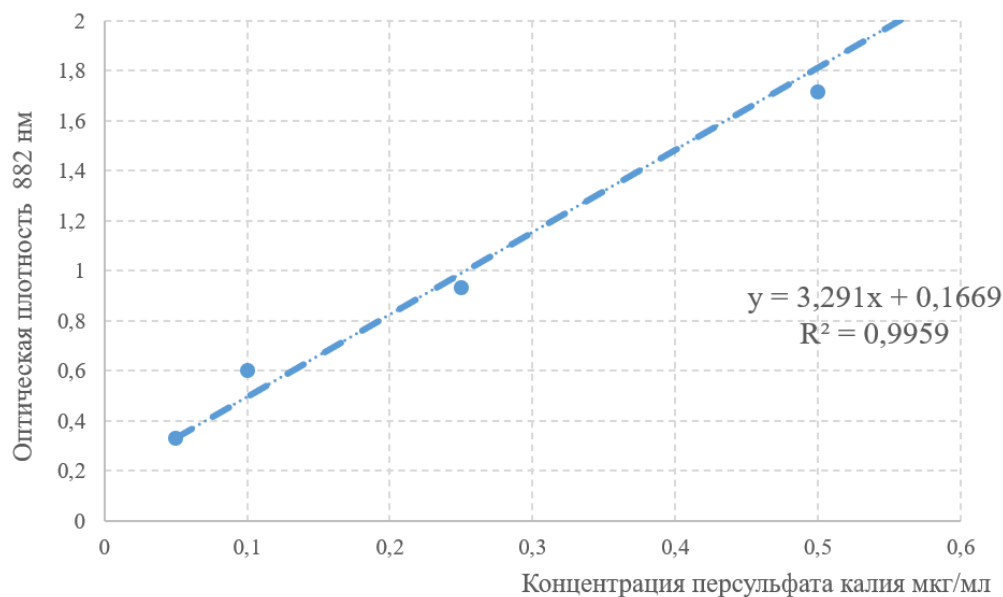
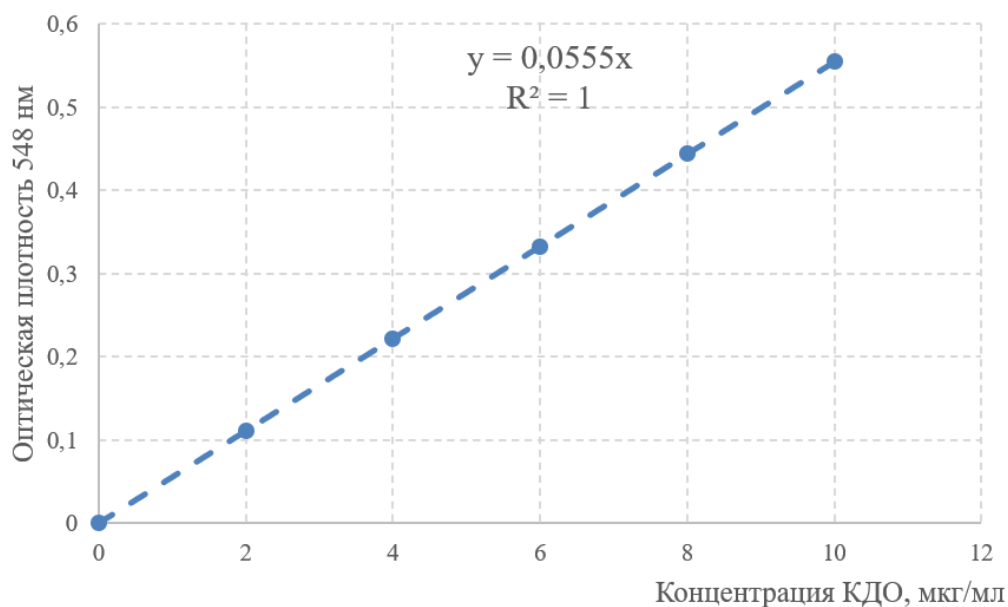
**В****Г**

Рисунок 5 — Градуировочные графики определения содержания: углеводов в ЛПС по глюкозе (А) и галактозе (Б), общего фосфора (В), 2-кето-3-дезоксооктоковой кислоты (Г)

Определение содержание общего фосфора и КДО углеводов в составе ЛПС проведено с использованием хромогенных реакций для углеводов двумя способами на глюкозу и галактозу, соответственно. Содержание компонентов и массовые доли ( $\omega$ ) представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Содержание и массовая доля компонентов в составе ЛПС *Enterobacter*

	278	378	21320	R12	R4
<i>Углеводы</i>					
<b>m</b> по галактозе, МГ/МЛ	0,42	0,4	0,3	0,5	0,7
<b>m</b> по глюкозе, МГ/МЛ	0,17	0,2	0,1	0,2	0,3
<b>ω</b> по галактозе, %	42	38	33	54	
<b>ω</b> по глюкозе, %	17	17	14	23	34
<i>Фосфор</i>					
<b>ω</b>	6,4	4,9	3,8	2,5	1,3
<i>КДО</i>					
	НД	НД	НД	0,6	0,5

## **Изучение состава и свойств ЛПС комплексом физико—химических методов**

В составе ЛПС присутствует липидная часть (Липид А), которая влияет на биологическую активность: чем больше количество жирных кислот, тем сильнее проявляются как негативные, так и полезные свойства.

### *Жирно-кислотный анализ липидной части*

В липидном составе образцов ЛПС 278, 378, 21320, R12 доминировал остаток 3-гидрокситетрадекановой кислоты (C14:0 3ОН) с минорным присутствием тетрадекановой, гексадекановой (пальмитиновой), цис,транс-октадекановой кислот. В составе ЛПС R4 доминировала тетрадекановой кислота (C14:0), а додекановая, гексадекановая и цис-октадекановая были в меньшем содержании, также обнаружили остаток жирной кислоты, ранее не идентифицированный, с высоким значением интенсивности.

При анализе выявили сходность жирно-кислотного состава для ЛПС почвенных, ризосферных и выделенных из кишечника личинок жука штаммов. ЛПС R4 обладал наибольшим количеством разных остатков жирных кислот (Рисунок 6).

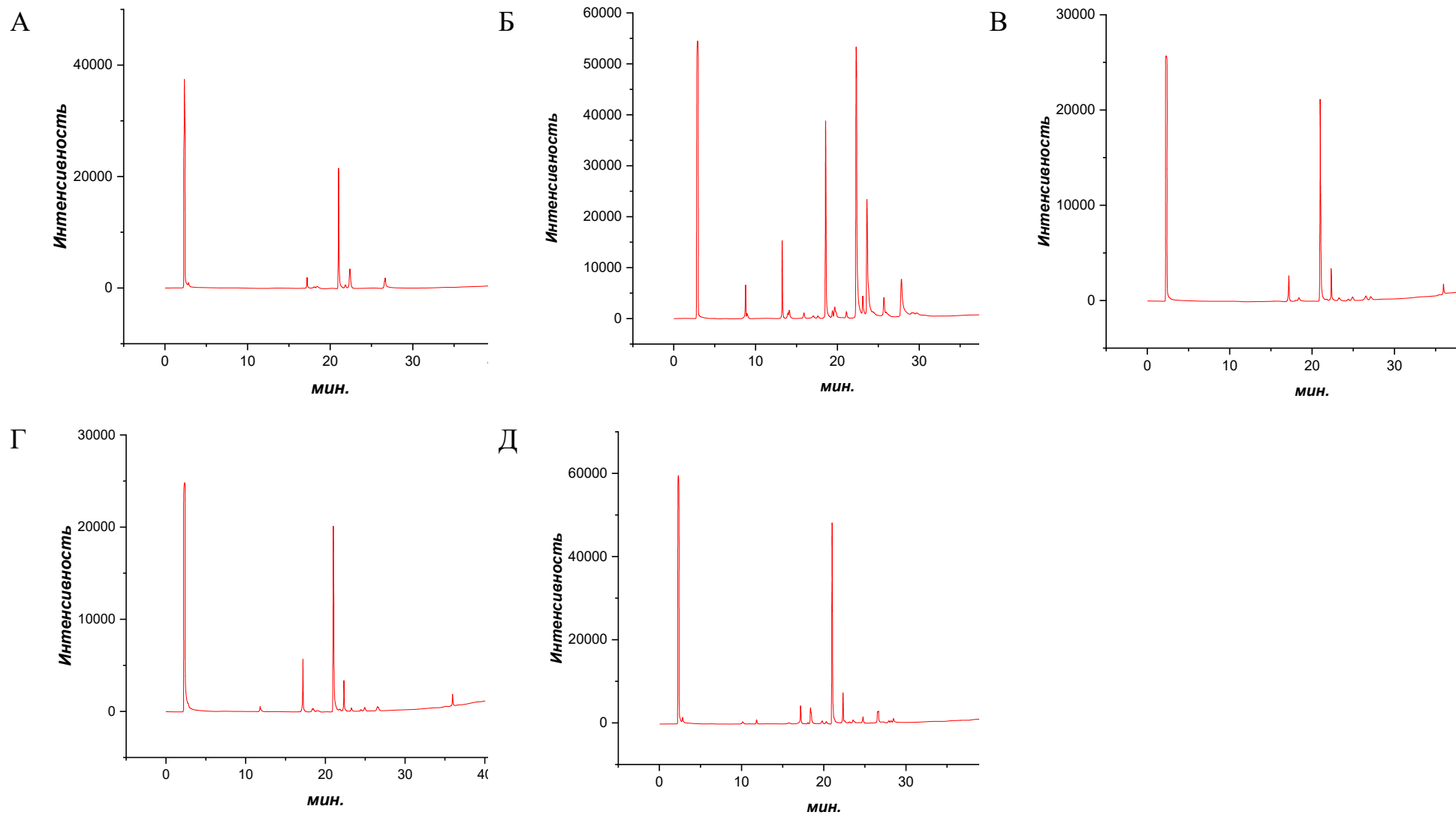


Рисунок 6 — Хроматограмма метильных эфиров жирных кислот, содержащихся в образцах ЛПС (А)R12, (Б)R4, (В)378, (Г)278, (Д)2132

*Характеристика надмолекулярных частиц методом динамического и электрофоретического рассеяния света*

Известно, что ЛПС в воде образуют надмолекулярные частицы, потому что являются амфифильными молекулами. Результаты измерений с помощью метода динамического рассеяния и электрофоретического рассеяния (таблица 3), показали, что наиболее стабильные системы — R12 и 21320; самые крупные мицеллы — 378; все образцы, кроме R4 являются однородными; образцы R4 и 378 при измерении  $\zeta$ -потенциала сконъюгировали.

Таблица 3 – Электрокинетические свойства и размер надмолекулярных частиц ЛПС

<b>Акроним</b>	<b><math>\zeta</math>-потенциал, mV</b>	<b>Размер мицелл, нм</b>	<b>PdI</b>
278	-19,2	37,84	0,30
378	-18,1	91,28	0,16
21320	-25,2	37,84	0,29
R12	-28,5	78,82	0,21
R4	-18,2	58,77	0,58

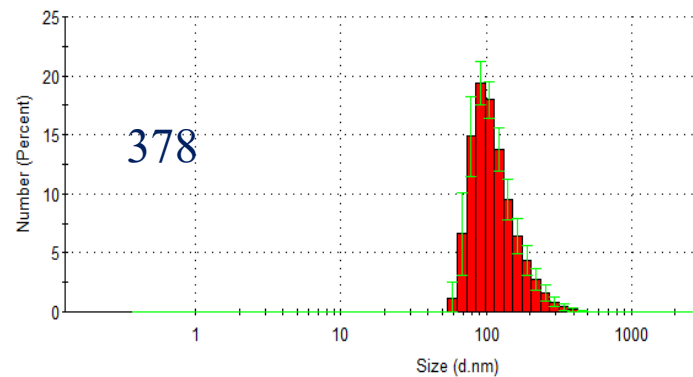
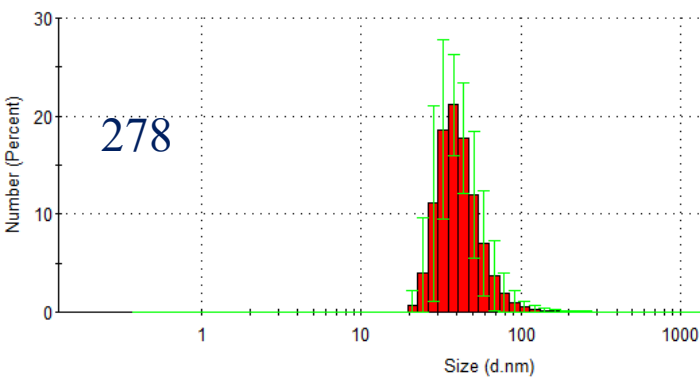
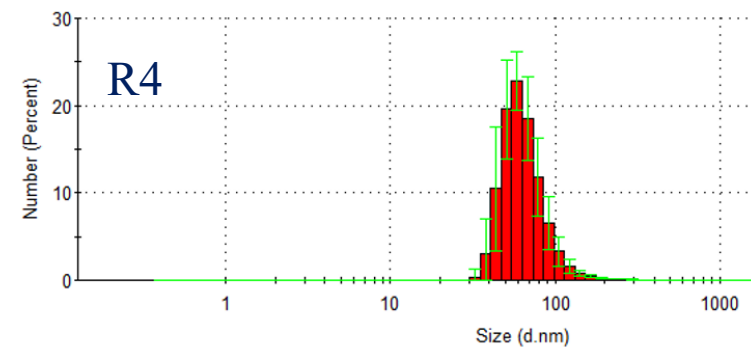
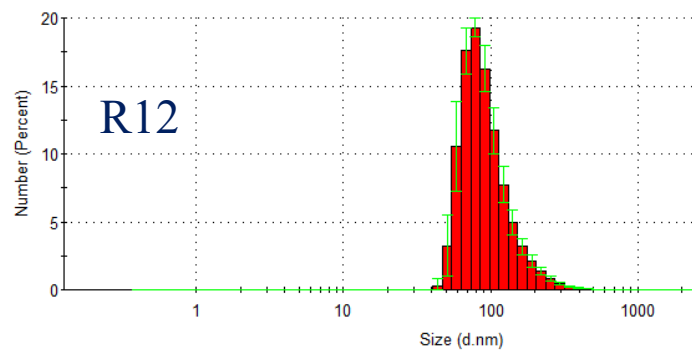
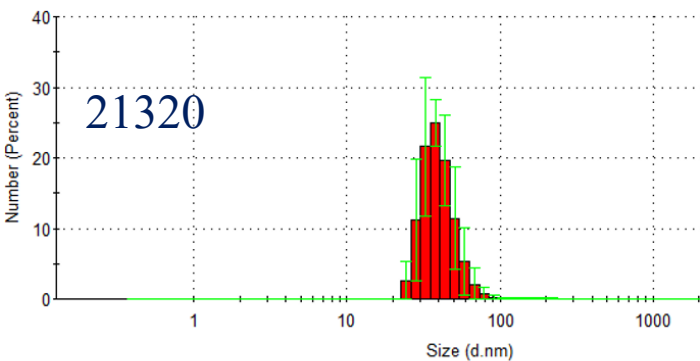


Рисунок 7 Статистические результаты измерения диаметра частиц ЛПС в водном растворе 1 мг/мл, полученные методом динамического рассеяния света

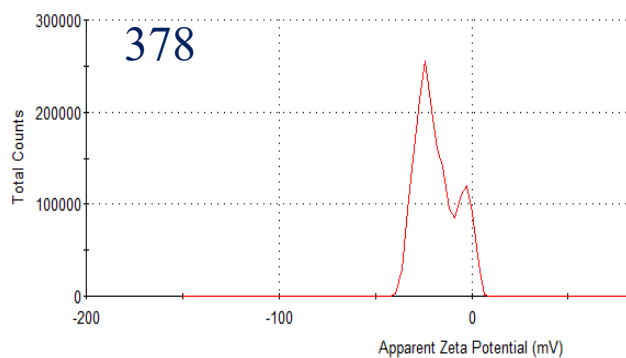
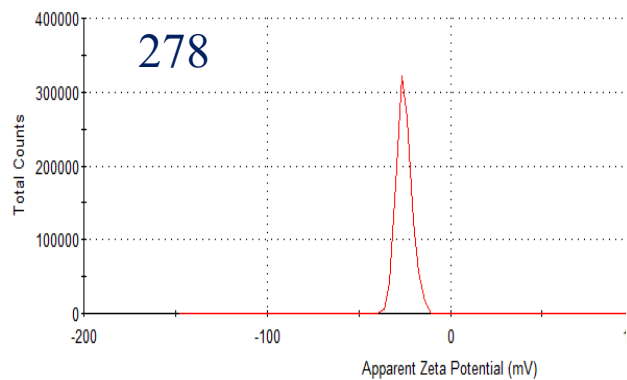
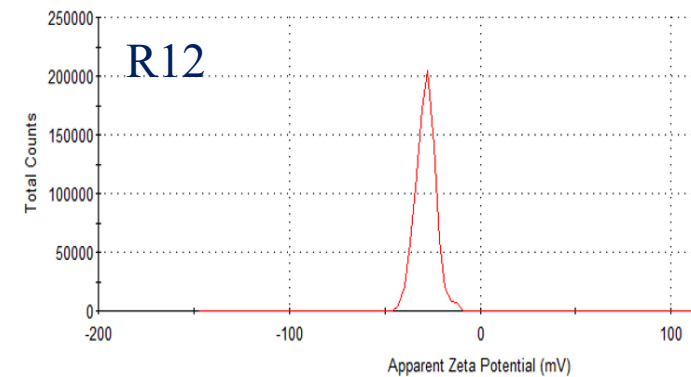
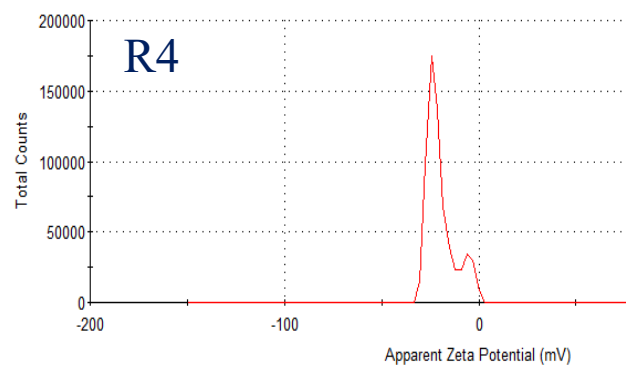
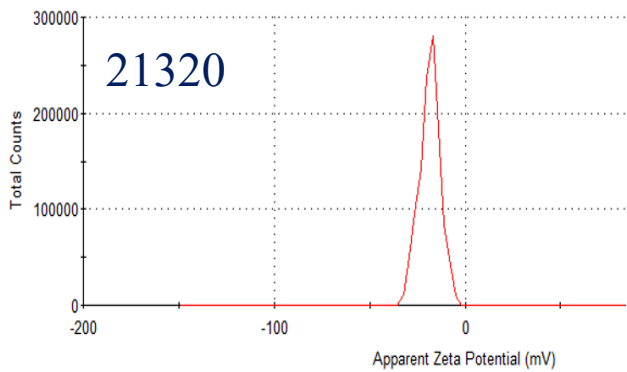


Рисунок 8 Результаты измерения заряда ( $\zeta$ -потенциала) ЛПС методом электрофоретического рассеяния света

### *Электрофоретическое разделение ЛПС в полиакриламидном геле*

Электрофоретическое разделение в полиакриламидном геле демонстрировало преобладание низкомолекулярных фракции в составе ЛПС. Яркие и темные полосы, которые находятся ближе к «финишу» — остатки жирных кислот.

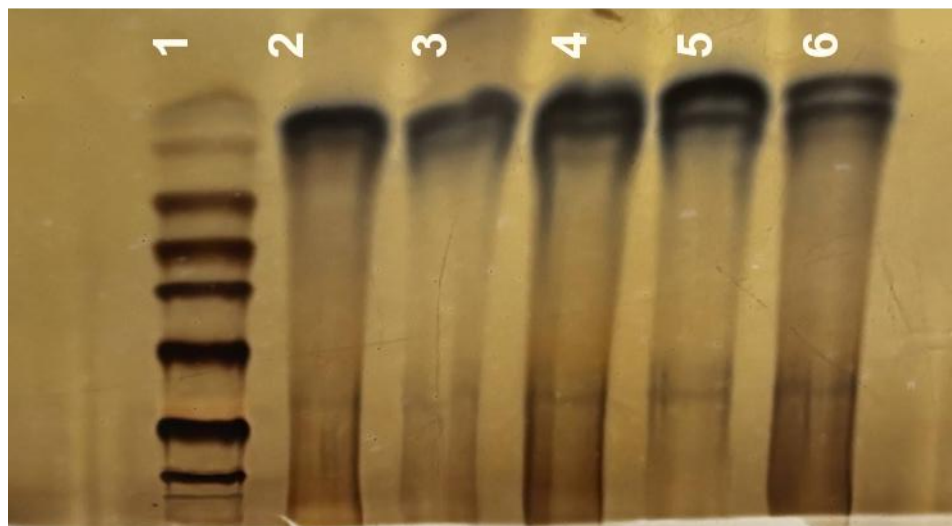


Рисунок 9—Электрофорез ЛПС (ДСН-ПААГ 10%), где 1- смесь белковых маркеров; 2 – R12; 3 – R4; 4 – 378; 5 – 21320; 6 - 278

### *Исследование структуры повторяющихся звеньев O-полисахарида R12 методом ЯМР*

Трисахаридная структура O-полисахаридного звена R12 была описана в статье

Спектр ЯМР по  $^{13}\text{C}$  соединения  $\text{LPS}_{\text{OH}}$  показал сигналы от трёх аномерных атомов углерода при  $\delta$  110,4, 103,4, 102,7 (последний — четвертичный атом углерода; данные эксперимента НМВС), две группы  $\text{HOCH}_2\text{-C}$  при  $\delta$  62,5 и 67,1 (C-6 Galp и Galf соответственно; характерный аномерный сигнал для  $\beta$ -Galf находится при  $\delta$  110,4), две группы  $\text{CH}_3\text{-C}$  при  $\delta$  18,9 и 23,6 (C-9 Pse и C-4 3Hb), две группы  $\text{C-CH}_2\text{-C}$  при  $\delta$  36,4 и 46,5 (C-3 Pse и C-2 Hb), два азотсодержащих атома углерода при  $\delta$  47,7 и 54,8, 12 кислородсодержащих атомов углерода сахарного кольца в области  $\delta$  66,2–84,5 (включая C-2 3Hb), одну N-ацетильную группу при  $\delta$  23,6 (Me) и группу CO

при  $\delta$  176,1, а также одну карбоксильную группу (C-1 Pse при  $\delta$  174,3). Спектр  $^1\text{H}$  ЯМР LPSOH содержал, в частности, сигналы двух аномерных протонов при  $\delta$  4,59 и 5,21, двух групп  $\text{CH}_3\text{-CH}$  при  $\delta$  1,22–1,23, трёх групп  $\text{CH-CH}_2\text{-C}$  при  $\delta$  1,76 и 2,64 ( $\text{H}_{3\text{ax}}$ ,  $\text{H}_{3\text{eq}}$  Pse) и при  $\delta$  2,34 ( $\text{H-2}$  3Hb), а также одну N-ацетильную группу при  $\delta$  2,01.

Структура OPS была подтверждена с помощью стандартного ЯМР-анализа. Спектры  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР LPSOH были интерпретированы с использованием экспериментов 2D  $^1\text{H}$ ,  $^1\text{H}$  COSY, TOCSY,  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  HSQC и HMBC, и были идентифицированы спиновые системы для Pse (модуль A), Galf (модуль B) и Galp (модуль C)

Таблица 4—Химические сдвиги LPS<sub>OH</sub> при 1 ч и <sup>13</sup>С ЯМР R12(δ, ppm).

Sugar residue	Nucleus	1	2	3 (3ax, 3eq)	4	5	6 (6a, 6b)	7	8	9
<b>A</b> →4)-β-Psep5Ac7(3Hb)-(2→	<sup>1</sup> H	-	-	1.76, 2.64	4.08	4.34	3.98	4.00	4.07	1.22
	<sup>13</sup> C	174.3	102.7	36.4	76.1	47.7	74.6	54.8	70.7	18.9
<b>B</b> →6)-β-D-Galf-(1→	<sup>1</sup> H	5.21	4.18	4.06	4.01	3.91	3.58, 3.81			
	<sup>13</sup> C	110.4	82.8	77.9	84.5	70.9	67.1			
<b>C</b> →3)-β-D-Galp-(1→	<sup>1</sup> H	4.59	3.55	3.68	4.04	3.69	3.77; 3.77			
	<sup>13</sup> C	103.4	71.3	81.5	69.8	76.5	62.5			
3Hb	<sup>1</sup> H	-	2.34	4.15	1.23					
	<sup>13</sup> C	174.8	46.5	66.3	23.6					

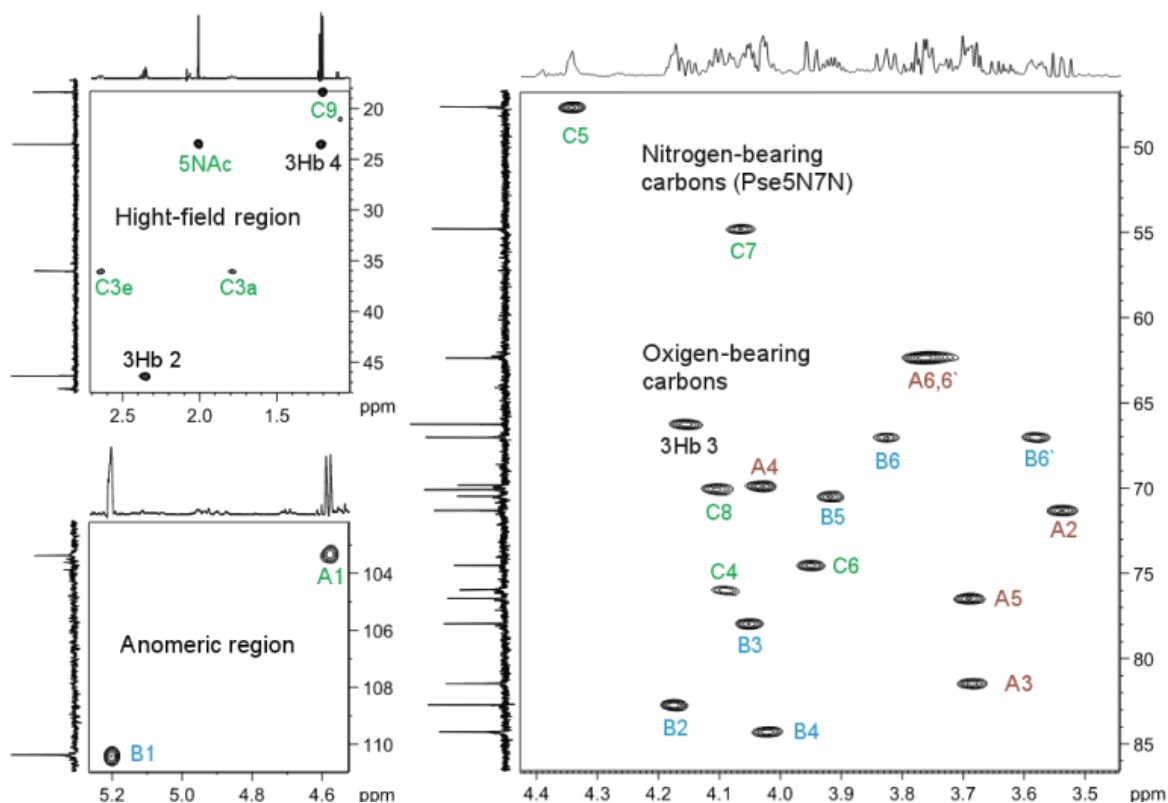
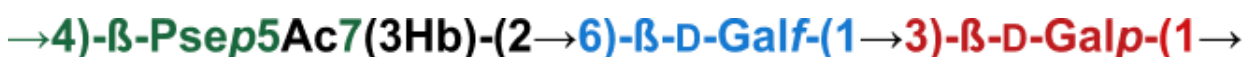


Рисунок 10—Фрагменты спектра ЯМР HSQC по  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  для LPSOH из *E. mori* R12. Соответствующие фрагменты спектров ЯМР по  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  отображены вдоль горизонтальной и вертикальной осей соответственно.

Расположение ацетильной и 3-гидроксибутирильной групп было определено с помощью двухмерного ЯМР-спектроскопического анализа LPSOH, проведенного в смеси 9:1  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$ , который выявил корреляции между протонами NH и CH. Сигналы для двух протонов NH наблюдались при  $\delta$  7,73 и 7,94 и были отнесены с помощью эксперимента TOCSY к NH-5 и NH-7 Pse, соответственно. Спектр ROESY показал корреляции NH-5 Pse с  $\text{CH}_3$  N-ацетильной группы при  $\delta\text{H}$  7,94/1,95 соответственно, что позволило определить положение NAc-группы. Перекрестный пик между NH-7 Pse и H-2 3Hb при  $\delta$  7,73/2,34 подтвердил присоединение 3Hb к N-7 Pse. Следовательно, производным псевдоаминокислоты является Psep5Ac7(3Hb).

Таким образом, O-полисахарид R12 имеет линейный трисахаридный O-мономер со структурой, показанной ниже:



*Исследование структуры повторяющихся звеньев O-полисахарида 21320  
методом ЯМР*

В спектре ЯМР по  $^{13}\text{C}$  LPS<sub>OH</sub> были обнаружены сигналы от четырёх аномерных атомов углерода при  $\delta$  97,5, 101,2, 104,2, 110,2, от трёх групп HOCH<sub>2</sub>-C при  $\delta$  62,0, 62,5 и 68,0 (C-6 двух Galp и Galf, соответственно), двух групп CH<sub>3</sub>-C при  $\delta$  18,1 и 23,3 (C-9 Pse и C-4 3Hb), две группы C-CH<sub>2</sub>-C при  $\delta$  34,3 и 46,2 (C-3 Pse и C-2 Hb), два азотсодержащих атома углерода при  $\delta$  48,4 и 64,7, 16 кислородсодержащих атомов углерода сахарного кольца в области  $\delta$  66,0–84,1 (включая C-2 3Hb), одну N-ацетильную группу при  $\delta$  23,1 (Me) и группы CO при  $\delta$  174,3, 174,5, 174,9 (C-1 Pse, 3Hb, NAc). Соответственно, в спектре  $^1\text{H}$  ЯМР LPS<sub>OH</sub> наблюдались три аномерных сигнала в области низких полей при  $\delta$  4,50, 5,08 и 5,14, другие протоны сахара в области  $\delta$  3,70–5,20, две группы CH<sub>3</sub>-CH при  $\delta$  1,20–1,23, три группы CH-CH<sub>2</sub>-C при  $\delta$  1,72 и 2,68 (H<sub>3ax</sub>, H<sub>3eq</sub> из Pse) и при  $\delta$  2,34 (H-2 из 3Hb), а также одна N-ацетильная группа при  $\delta$  2,01.

Таблица 5—Химические сдвиги LPS<sub>OH</sub> при 1 ч и 13 С ЯМР 21320(δ, ppm).

Sugar residue	Nucleus	1	2	3 (3ax, 3eq)	4	5	6 (6a, 6b)	7	8	9
LPS <sub>OH</sub>										
→4)-β-Psep5Ac7(3Hb)-(2→	<sup>1</sup> H	-		1.72, 2.68	4.11	4.28	3.89	4.02	4.07	1.20
<b>D</b>	<sup>13</sup> C	174.3	101.2	34.3	70.3	48.4	68.0	54.7	70.7	18.1
→3)-β-D-Galp-(1→	<sup>1</sup> H	4.50	3.60	4.13	3.93	3.64	3.74, 3.75			
<b>C</b>	<sup>13</sup> C	104.2	70.5	76.4	68.0	76.0	62.0			
→6)-α-D-Galf-(1→	<sup>1</sup> H	5.14	4.18	4.06	4.06	4.02	3.77, 4.05			
<b>B</b>	<sup>13</sup> C	110.2	82.4	77.8	84.1	70.9	72.1			
→3)-α-D-Galp-(1→	<sup>1</sup> H	5.08	3.90	3.72	4.11	4.21	3.72, 3.73			
<b>A</b>	<sup>13</sup> C	97.5	74.9	78.6	70.1	72.1	62.5			
3Hb	<sup>1</sup> H	-	2.34	4.16	1.23					
	<sup>13</sup> C	174.5	46.2	66.0	23.3					

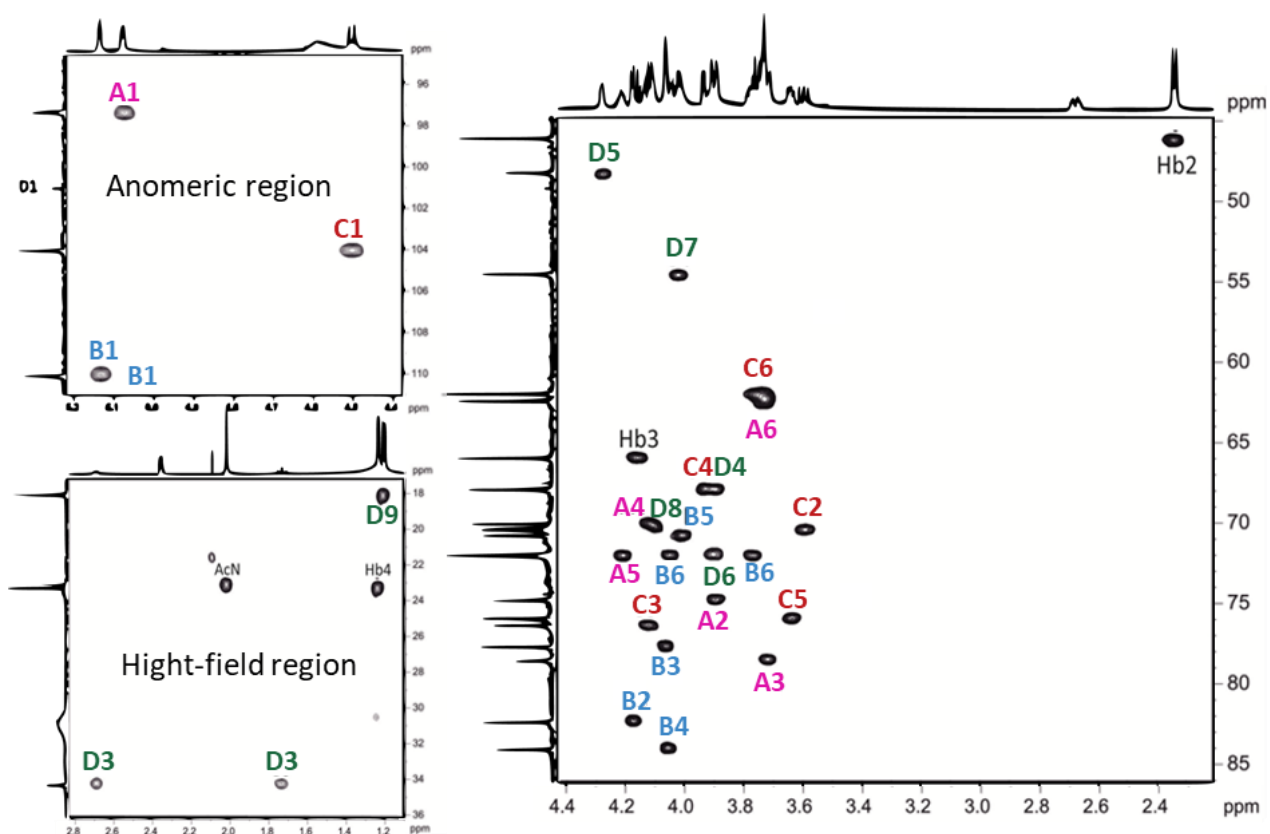


Рисунок —11. Фрагменты спектра ЯМР HSQC по  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  для  $\text{LPS}_{\text{OH}}$  21320.

Структура была подтверждена с помощью стандартного ЯМР-анализа. Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$   $\text{LPS}_{\text{OH}}$  были интерпретированы с использованием двухмерных экспериментов  $^1\text{H}, ^1\text{H}$  COSY, TOCSY, ROESY,  $^1\text{H}, ^{13}\text{C}$  HSQC и HMBC, и были идентифицированы спиновые системы для Pse (модификация D), Galp (модификация C), Galf (модификация B) и Galr (модификация A) (табл. 1). Относительно большая константа связи  $J_{1,2}$  ( $\sim 8$  Гц) показала, что блок C имеет  $\beta$ -связь, тогда как значительно меньшее значение ( $< 3$  Гц) указывало на  $\alpha$ -связь блоков B и A.

Расположение ацетильной и 3-гидроксибутирильной групп было определено с помощью двухмерного ЯМР-спектроскопического анализа  $\text{LPS}_{\text{OH}}$ , проведенного в смеси  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$  в соотношении 9:1, что позволило выявить корреляции между протонами NH и CH. Сигналы двух протонов NH наблюдались при  $\delta$  7,73 и 8,14 и были отнесены с помощью эксперимента TOCSY соответственно к NH-7 и NH-5 Pse.

Спектр ROESY показал корреляции между NH-5 молекулы Pse и  $\text{CH}_3$  N-

ацетильной группы при  $\delta_n$  8,14/2,03 соответственно, что позволило определить положение NAc-группы. Перекрестный пик между NH-7 Pse и H-2 3Hb при  $\delta$  7,73/2,35 свидетельствовал о присоединении 3Hb к N-7 Pse. Следовательно, производным псевдоаминовой кислоты является Psep5Ac7(3Hb).

Таким образом, O-полисахарид содержит линейный тетрасахаридный O-мономер со структурой, представленной ниже:



ИК— спектроскопия ЛПС

Для сравнения структур O-полисахаридного звена был выбран метод ИК-спектроскопии благодаря своей экспрессности, простоте выполнения и экономичному расходу образцов. Использование данного метода для определения функциональных групп и химических связей в полисахаридной структуре осложнено наложением сигналов моносахаридных звеньев друг на друга, в следствии своей структуры. Данный метод решили использовать из-за наличия псевдоаминовой кислоты, наличие которой не характерно для большинства Ополисахаридов.

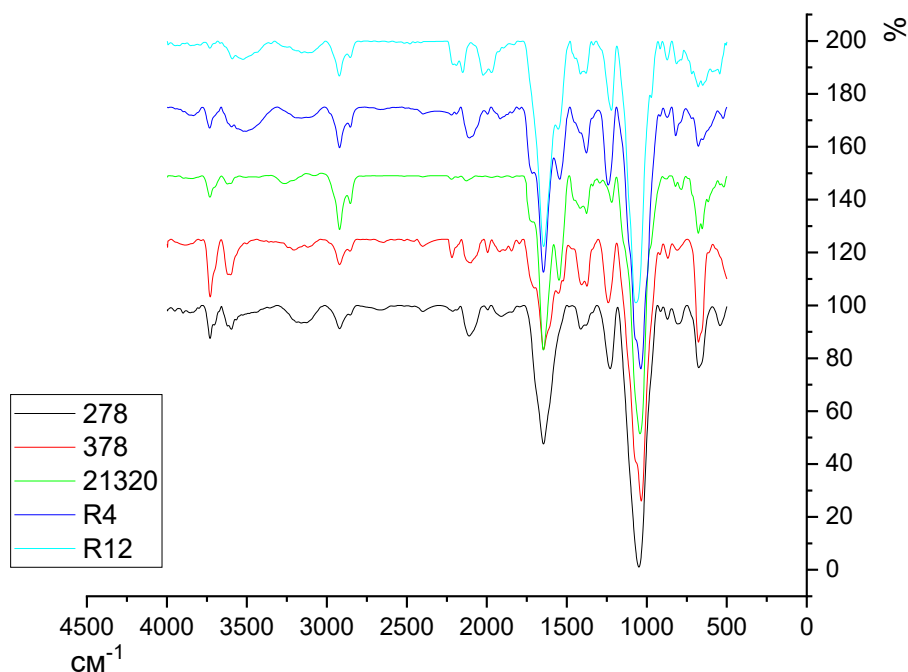


Рисунок 12— ИК- спектры ЛПС *Enterobacter*

При рассмотрении спектров, обнаружили, что у образца 278

отсутствовал явный пик при  $\nu$  1550  $\text{см}^{-1}$ , который характерен для N—H валентной группы.

В таблице 6 были перечислены предполагаемые колебания связей для полученных спектральных линий.

Таблица 6 — Таблица характеристических ИК частот присутствующих в спектре образцов ЛПС

$\nu$ 670 $\text{см}^{-1}$	СС
$\nu$ 860 $\text{см}^{-1}$	СО—С (характерно для $\alpha\beta$ -аномеров)
$\nu$ 1040 $\text{см}^{-1}$	С—О, С—С
$\nu$ 1250 $\text{см}^{-1}$	RCO—ОН
$\nu$ 1380 $\text{см}^{-1}$	СО—С валентная, симметричная
$\nu$ 1550 $\text{см}^{-1}$	N—H валентная
$\nu$ 1645 $\text{см}^{-1}$	C=C
$\nu$ 2900 $\text{см}^{-1}$	RCO—ОН
$\nu$ 3200 $\text{см}^{-1}$	RCO—ОН (димер, широкий)
$\nu$ 3600 $\text{см}^{-1}$	RCH <sub>2</sub> ОН

### Компьютерные методы моделирования

Полученные методом ЯМР данные о структуре визуализировали с помощью программы SNFG editor  $\beta$  и ChemDraw, затем определяли уникальность звена О-полисахарида проводя поиск по базе данных углеводов (CSDB)

#### *Моделирование структур олигосахаридов*

Построили шаростержневые модели (рисунок 13, 14) из 1-го, 2-х и 4-х звеньев ОПС. При увеличении количества моносахаридов образовывалась спиралевидная структура из-за  $\beta$  и 1-6 связи.

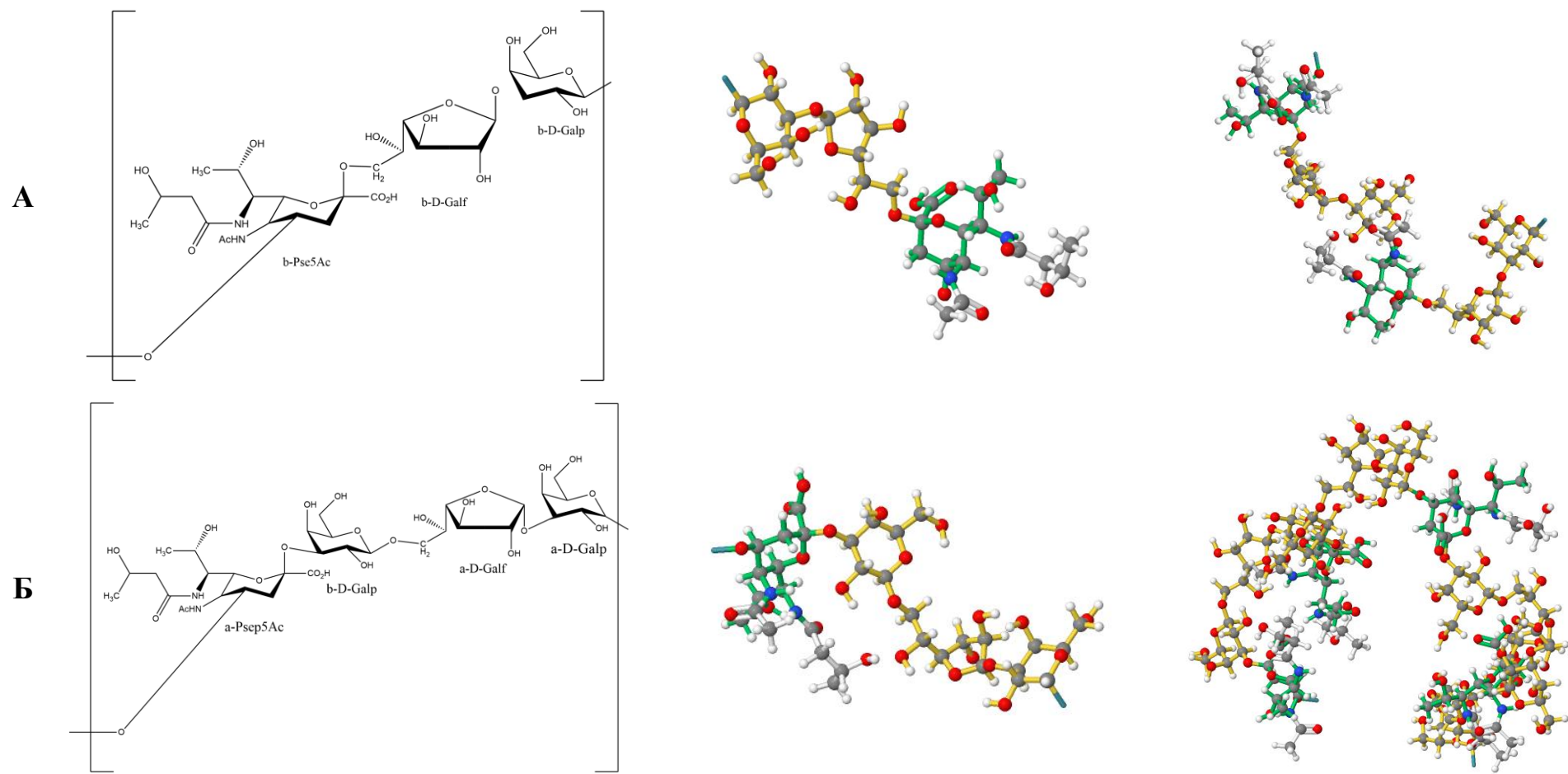


Рисунок 13— Структурные формулы и молекулярные модели повторяющегося звена O-полисахарида (А)R12, (Б)21320

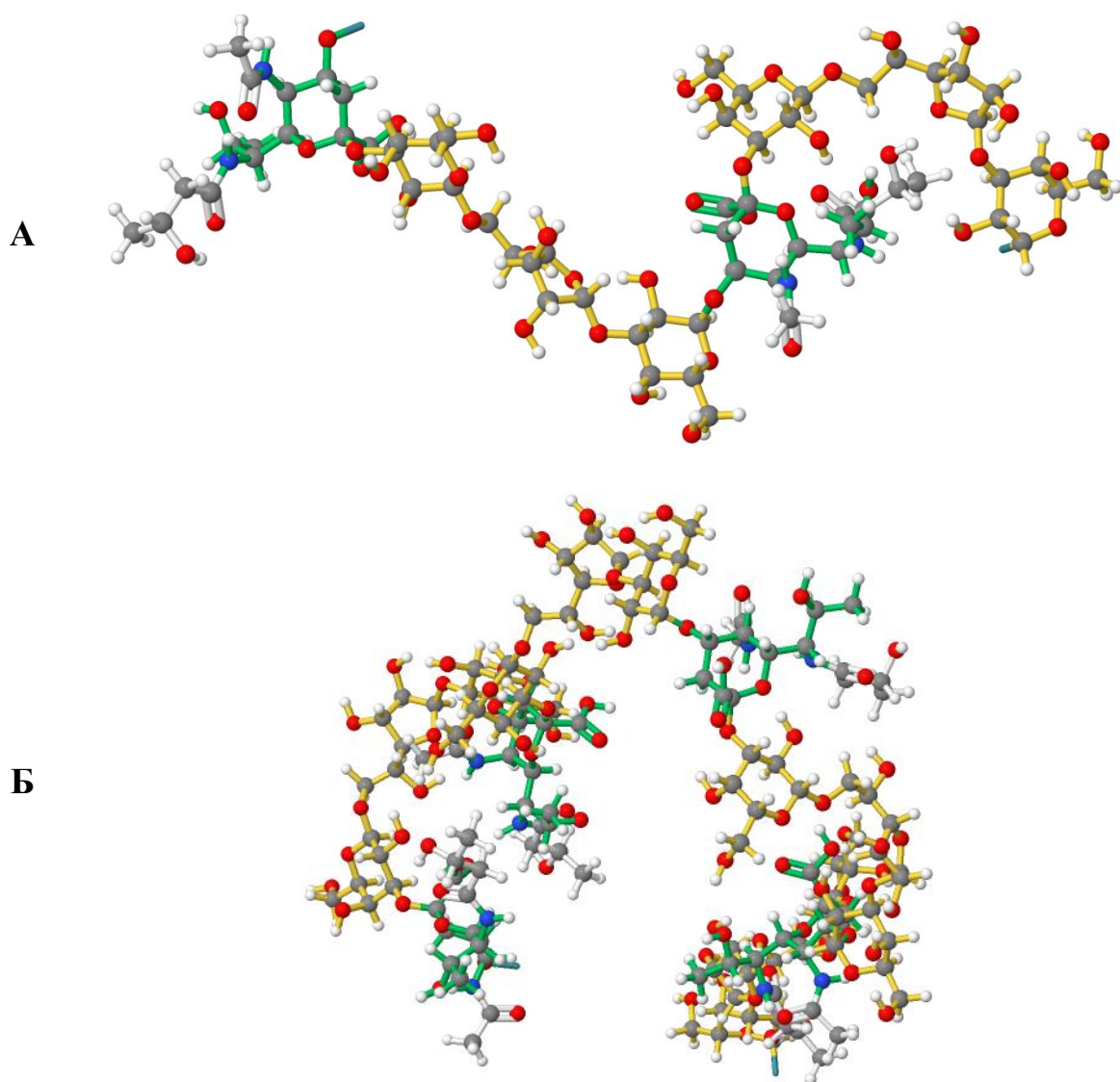


Рисунок 14—Молекулярные модели 4—х повторяющихся звеньев О-полисахарида (А)R12, (Б)21320

Структура О-полисахаридного звена R12 ранее была выявлена для штамма *Pseudomonas chlororaphis* subsp. UCM B-106 (Zdrovenko et al., 2016), а структура ОПС 21320 является уникальной, согласно Carbohydrate Structure Database.

*Генетика биосинтеза повторяющегося звена О-полисахарида*

Кластеры генов биосинтеза О-антигена штаммов *Enterobacter* насчитывает от 12 (для R12) до 18 (для 378) генов (рисунок х). Кластеры генов R12 и 21320 оказались схожи: содержали шесть генов синтеза сахарных нуклеотидов (CMP-Pse5Ac7Ac) *pseBCFGHI*, один ген мутазы *glf*, катализирующий биосинтез UDP- $\alpha$ -D-галактофуранозы из UDP- $\alpha$ -D-

галактопираноза, три гена гликозилтрансферазы (*wbaP*, *orf1* и *orf2*) и два гена, обрабатывающих О-единицу (*wzx* и *wzy*).

Кластеры генов 278 и 378 содержали ген *rfbB* катализирующий превращение dTDP- $\alpha$ -D-глюкозы в dTDP-4-кето-6-дезоксиглюкозу, *rfbD* синтезирующий dTDP-4-дегидрорамнозы редуктазы, *rfbA* кодирующий глюкозо-1-фосфатный тимидилат-1-фосфорилазу, ген *rfbC* ,связанный с биосинтезом клеточной стенки.

Все гены имели одинаковое направление транскрипции, от *galF* до *gnd*. Структура выявленных кластеров генов биосинтеза О-антигена R12 и 21320 ранее не описывалась для бактерий рода *Enterobacter* [4]

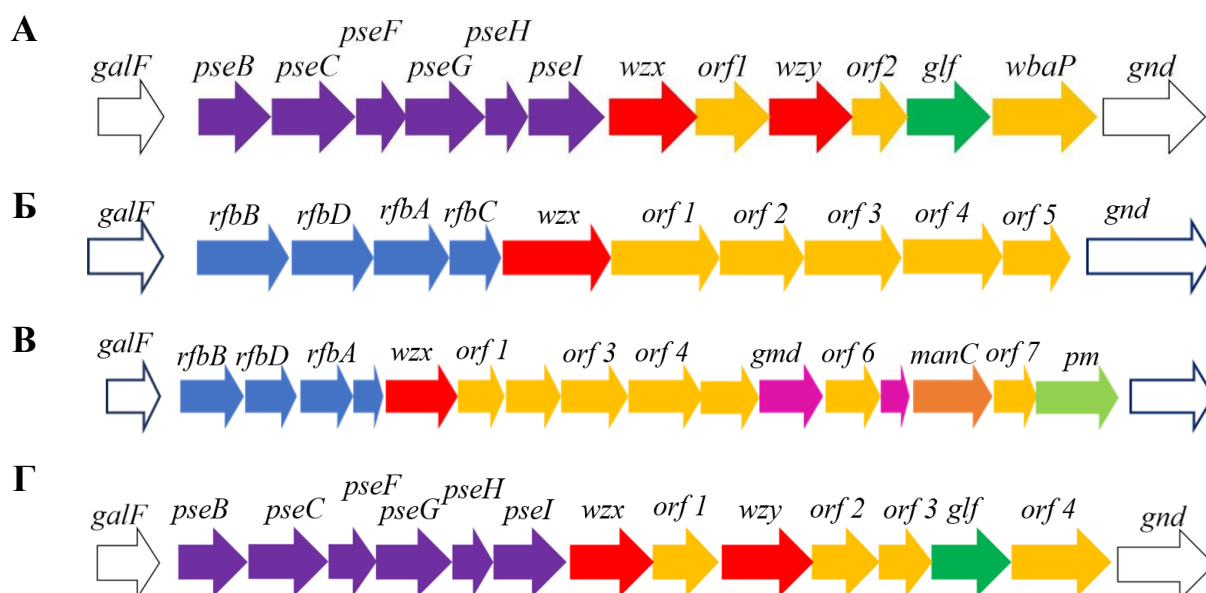


Рисунок 15—Схема строения генного кластера биосинтеза О-полисахарида (А)R12, (Б)278, (В) 378, (Г) 21320.

### Влияние ЛПС на рост микрорастений картофеля *in vitro*

Добавление ЛПС достоверно улучшало рост микрорастений картофеля сорта Кондор при  $\alpha=0,5$  (уровень значимости): 278 влиял на длину побега и длину главного корня, так же на длину корня влиял 378. Подробные результаты измерений морфометрических признаков растений представлены в таблице 7.

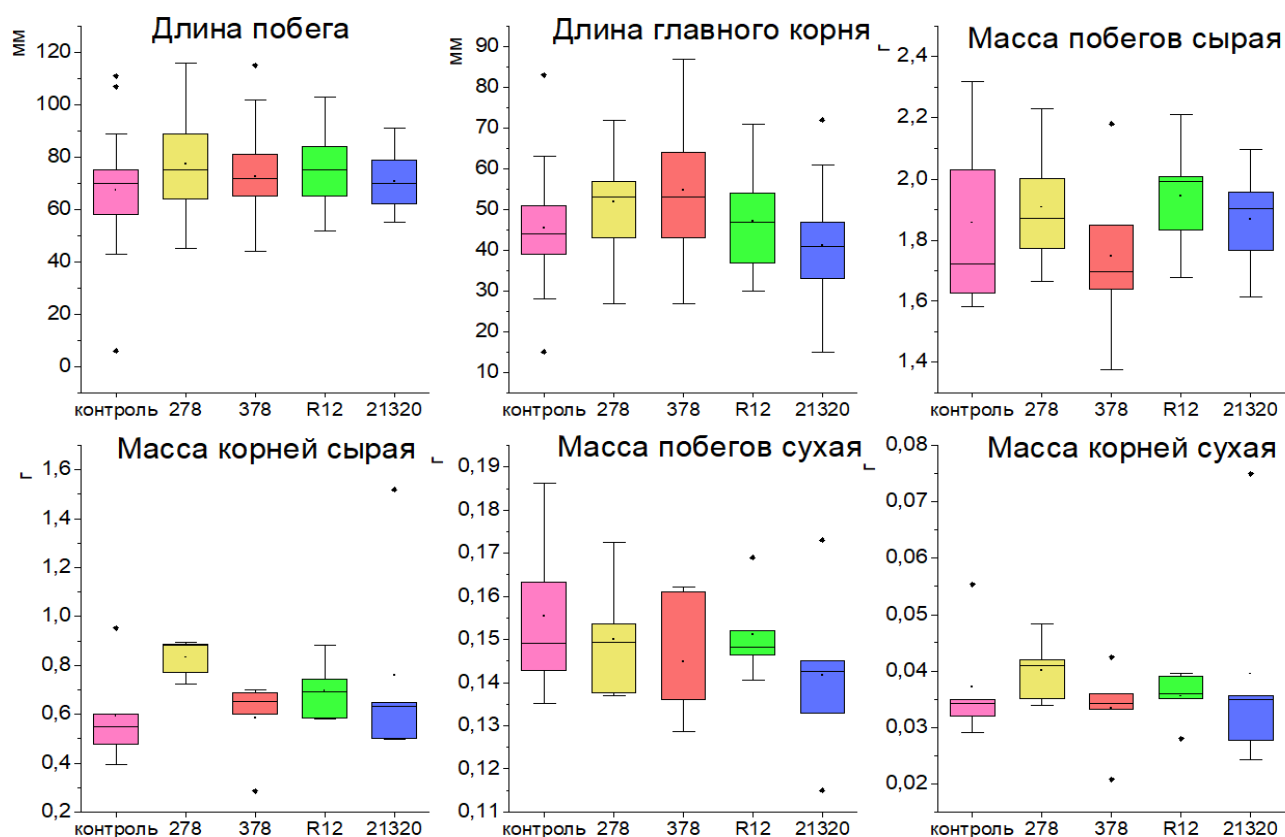


Рисунок 16— Статистические данные (боксплот) влияния ЛПС на микрорастения картофеля.

Таблица—7 Средние значения измерения морфологических признаков картофеля. Достоверно отличные от контроля значения отметили символом \*

	контроль	278	378	21320	R12
$\Delta L$ побега, мм	62,2	77,2*	72,64	76,84	70,76
F=1,6					
$\Delta L$ главного корня, мм	45,4	51,8*	54,7*	47,1	41,2
F=4,3					
$\Delta m$ сырая побеги, г	1,8	1,9	1,7	1,9	1,9
F=0,4					
$m\Delta$ сухая побеги, г	0,15	0,15	0,14	0,15	0,14

F=0,5					
$\Delta m$ сырая корни , Г	0,6	0,8	0,6	0,7	0,8
F=0,9					
$\Delta m$ сухая корни , МГ	37	40	33	35	39
F=0,3					

## ВЫВОДЫ

Впервые экстрагированы липополисахариды из наружной мембраны неклинических штаммов бактерий рода *Enterobacter*, выделенных из растений, почвы и насекомых. **Выход липополисахарида из сухой бактериальной массы составил от 7,3 до 12%.**

Изучен углеводный, фосфорный и КДО состав ЛПС с использованием комбинации колориметрических методов: массовая доля содержания углеводов **по галактозе 33% до 54%, по глюкозе—17% до 34%**; массовая доля содержания **фосфора от 1,3% до 6,4%.**

В составе липида А липополисахаридов 278, 378, R12, 21320 были обнаружены **остатки тетрадекановой, гексадекановой и цис,транс—октадекановой жирных кислот**; образец R4 содержал большее количество различных насыщенных и ненасыщенных жирных кислот.

Все ЛПС в водной среде образовывали **крупные мицеллы с отрицательным дзета потенциалом**. Электрофоретическим разделением выявили, что в ЛПС доминировали низкомолекулярные фракции.

Впервые методом ЯМР **получены трисахаридная и тетрасахаридная структуры** ЛПС штаммов R12 и 21320 соответственно, содержащие фрагменты псевдоаминовой кислоты и  $\alpha$  и  $\beta$  D-галактопиранозы, галактофуранозы. Для обнаружения колебания характерного для псевдоаминовой кислоты использовали ИК-спектроскопию: пик не был обнаружен только для образца ЛПС 278.

Построены 3D модели повторяющихся звеньев ЛПС. Выяснили, что из-за 1-6 и  $\beta$  связи структуры закручиваются в спираль. Структура ЛПС 21320 **является уникальной** согласно Carbohydrate Structure Database.

Добавление ЛПС штаммов 278 и 378 **достоверно улучшало** рост микрорастений *Solanum tuberosum* L. (картофель) сорта Кондор

## ПУБЛИКАЦИИ

По результатам работы была выпущена статья

Perepelov A. V. и др. Structure and genetics of the O-antigen of *Enterobacter mori* GmNs1 containing 5-N-acetyl-7-N-(3-hydroxybutyryl)pseudaminic acid // Carbohydrate Research. 2026. Т. 565. С. 109931.

Результаты работы были апробированы на **VII Всероссийской конференции «Фундаментальная гликобиология», 22 – 26. 09. 2025, Москва, на базе Государственного Научного Центра Российской Федерации Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова Российской академии наук (ГНЦ ИБХ РАН).**