

DOI: 10.21055/0370-1069-2026-1-123-128

УДК 615.47:579.842.23

И.В. Конышев<sup>1,2</sup>, Л.Г. Дудина<sup>1,2</sup>, А.А. Бывалов<sup>1,2</sup>

## Оценка значимости коллагена и фибронектина позвоночных в адгезии *Yersinia pseudotuberculosis* и *Yersinia pestis* с использованием оптической ловушки

<sup>1</sup>Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Российская Федерация; <sup>2</sup>Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация

В настоящее время большое внимание уделяется изучению механизмов адгезии патогенов к клеткам и тканям человека. Наряду со стандартными микробиологическими техниками с этой целью широко применяются современные биофизические методы, среди которых особое место занимает оптическая ловушка, позволяющая захватывать и перемещать отдельные бактериальные клетки с измерением силы связи между ними и целевыми молекулами. **Цель** работы состояла в оценке значимости коллагена и фибронектина в адгезии клеток *Yersinia pseudotuberculosis* O1b и вакцинного штамма *Yersinia pestis* EV НИИЭГ, выращенных при разной температуре, с использованием оптической ловушки. **Материалы и методы.** Бактерии, выращенные при двух температурах (+10 и +37 °С для клеток *Y. pseudotuberculosis* и +27 и +37 °С для клеток *Y. pestis*), захватывали лазерным лучом и пошагово подводили к стеклянным подложкам, обработанным целевыми белками. Спустя одну секунду после контакта клетку отводили в полуавтоматическом режиме с постоянной скоростью до наблюдения резкого скачка на хронограмме сигнала, величину которого пересчитывали в единицы силы. Различия между массивами данных определялись по средним и медианным силам, а также по результатам построения гистограмм распределения сил взаимодействия. **Результаты и обсуждение.** Показана значимость коллагена в адгезии бактерий *Y. pseudotuberculosis*, выращенных при +37 °С, но не при +10 °С. При работе с фибронектином не выявлено выраженных отличий между бактериями двух видов иерсиний при всех использованных температурных режимах их выращивания. Во всех случаях взаимодействие клеток иерсиний с коллагеном и фибронектином оказалось более прочным по сравнению с контролем (бычьим сывороточным альбумином): соответствующие значения силы связи составили 7,2, 8,1 и 2,0 пН для клеток 1b-10; 12,4, 7,6 и 4,7 пН для клеток 1b-37; 6,1, 6,6 и 4,4 пН для клеток EV-27; 7,4, 7,3 и 4,3 пН для клеток EV-37. Взаимодействие клеток иерсиний с обоими белками, вероятно, обусловлено физико-химическими свойствами поверхностных структур бактерий и компонентов соединительной ткани, а также условиями проведения экспериментов. Выявление механизмов таких взаимодействий требует постановки дополнительных опытов с использованием индивидуальных антигенов иерсиний, нанесенных на полистирольные микроферы. Используемые методические подходы могут быть востребованы при работе с другими патогенами.

**Ключевые слова:** адгезия, *Yersinia*, лазерная ловушка, коллаген, фибронектин, сила взаимодействия.

Корреспондирующий автор: Бывалов Андрей Анатольевич, e-mail: byvalov@nextmail.ru.

Для цитирования: Конышев И.В., Дудина Л.Г., Бывалов А.А. Оценка значимости коллагена и фибронектина позвоночных в адгезии *Yersinia pseudotuberculosis* и *Yersinia pestis* с использованием оптической ловушки. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2026; 1:123–128. DOI: 10.21055/0370-1069-2026-1-123-128  
Поступила 23.07.2025. Отправлена на доработку 30.10.2025. Принята к публикации 23.01.2026.

I.V. Konyshev<sup>1,2</sup>, L.G. Dudina<sup>1,2</sup>, A.A. Byvalov<sup>1,2</sup>

## Assessing the Significance of Vertebrate Collagen and Fibronectin in Adhesion of *Yersinia pseudotuberculosis* and *Yersinia pestis* Using an Optical Trap

<sup>1</sup>Institute of Physiology, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar, Russian Federation;

<sup>2</sup>Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

**Abstract.** Currently, much attention is paid to the study of mechanisms of pathogen adhesion to human cells and tissues. Along with standard microbiological techniques, advanced biophysical methods are widely used for this purpose, among which a special place is occupied by optical trapping, which allows catching and moving individual bacterial cells with measurement of the interaction force between them and target molecules. **The aim** of this work was to evaluate the significance of collagen and fibronectin in adhesion of *Yersinia pseudotuberculosis* O1b and the vaccine strain *Yersinia pestis* EV NIEG, cultivated at different temperatures, applying optical trap. **Materials and methods.** Bacteria grown at two temperatures (+10 and +37 °C for *Y. pseudotuberculosis* or +27 and +37 °C for *Y. pestis*) were caught by a laser beam and stepwise brought to the protein-coated glass. One second after the contact, the cell was retracted in semi-automatic mode at a constant speed until a spike was observed on the signal chronogram, and its voltage then was converted into force units. Differences between data sets were determined by the mean and median forces, as well as by the results of constructing histograms of the distribution of interaction forces. **Results and discussion.** The significance of collagen in the adhesion of *Y. pseudotuberculosis* grown at +37 °C but not at +10 °C was shown. Fibronectin demonstrated no pronounced differences between the bacteria of the two *Yersinia* species at all the cultivation temperature modes. In all cases, affinity of *Yersinia* cells with collagen and fibronectin was higher compared to the control, bovine serum albumin: 7.2, 8.1, and 2.0 pN for 1b-10 cells; 12.4, 7.6, and 4.7 pN for 1b-37 cells; 6.1, 6.6, and 4.4 pN for EV-27 cells; 7.4, 7.3, and 4.3 pN for EV-37 cells, respectively. The binding of *Yersinia* to collagen and fibronectin is probably due to the physicochemical properties of the bacterial surface structures and components of connective tissue, as well as experimental conditions. Revealing the mechanisms of such interactions requires additional investigations

of individual *Yersinia* antigens applied onto polystyrene beads. The method may be introduced when working with other pathogens too.

**Key words:** adhesion, *Yersinia*, laser trap, collagen, fibronectin, interaction force.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Funding:** The authors declare no additional financial support for this study.

**Corresponding author:** Andrey A. Byvalov, e-mail: byvalov@nextmail.ru.

**Citation:** Konyshov I.V., Dudina L.G., Byvalov A.A. Assessing the Significance of Vertebrate Collagen and Fibronectin in Adhesion of *Yersinia pseudotuberculosis* and *Yersinia pestis* Using an Optical Trap. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2026; 1:123–128. (In Russian). DOI: 10.21055/0370-1069-2026-1-123-128

Received 23.07.2025. Revised 30.10.2025. Accepted 23.01.2026.

Konyshov I.V., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6575-9630>  
Dudina L.G., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2172-9015>

Byvalov A.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1117-5896>

Первичная адгезия – ключевой фактор патогенеза многих инфекций, определяющий особенности его протекания: продолжительность инкубационного периода, длительность и тяжесть острой фазы, время выздоровления либо перехода болезни в хроническую форму. Велика роль этого процесса в образовании биопленок и поддержании гомеостаза внутри ценозов на поверхности слизистых, а также в инвазии патогенов и длительной их персистенции [1]. Мишенями для микробной адгезии могут быть как отдельные молекулы в составе цитоплазматической мембраны (рецепторы [2], интегрин [3], липиды [4]), так и компоненты подслизистой и внеклеточного матрикса (ламинин, эластин, коллаген, фибронектин и т.д.). Последние два белка составляют основу соединительной ткани, взаимодействие с которой отдельных антигенов и цельных бактерий представляет большой научный интерес.

Коллаген – основное вещество соединительной ткани. Будучи наиболее распространенным белком у млекопитающих, он составляет около 30 % от общей белковой массы тела [5], входит в состав кожи, костей, хрящей, кровеносных сосудов и базальной мембраны, подстилающей эпителии [6]. Молекула коллагена (M ~ 300 кДа) состоит из трех  $\alpha$ -спиралей, обогащенных аланином, глицином, оксипролином и пролином. Последние три аминокислоты располагаются последовательно, формируя регулярный мотив, обеспечивающий плотное скручивание первичных  $\alpha$ -цепей с образованием тонких нитей и более крупных волокон. На сегодняшний день известно 28 типов коллагена, различных по структуре, функциям и местонахождению в организме [7]. Помимо структурной роли, коллаген укрепляет межклеточные контакты и принимает участие в адгезии ряда патогенов, среди которых *Campylobacter jejuni*, *Clostridium difficile*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Porphyromonas gingivalis*, *Streptococcus mutans*, *Yersinia enterocolitica* и др. [8].

Фибронектин – гликопротеин внеклеточного матрикса (M ~ 450 кДа), молекула которого содержит две субъединицы, соединенные между собой дисульфидными мостиками. Каждая содержит несколько функциональных доменов, отвечающих за взаимодействие с клеточными рецепторами (прежде всего с интегринами) и компонентами внеклеточного матрикса (коллагеном, эластином, протеогликанами,

гепарином, фибрином и т.д.) [9]. Известны две изоформы фибронектина – клеточная (нерастворимая) и плазменная (растворимая). Первая секретируется фибробластами, вторая выделяется гепатоцитами в кровоток, ускоряя заживление ран и свертывание крови. В последние десятилетия фибронектин привлекает внимание исследователей не только как структурный компонент тканей, но и как перспективный маркер и терапевтическая мишень при различных патологиях, включая фиброз, онкологические заболевания, незаживающие раны и системное воспаление. Наряду с коллагеном этот белок образует прочные связи с адгезинами некоторых бактерий, облегчая диссеминацию последних. Установлено высокое сродство к фибронектину клеток *Borrelia burgdorferi*, *Bartonella henselae*, *Haemophilus influenzae*, *Prevotella* spp. и *Salmonella enterica* [10].

Метод оптической ловушки, разработанный А. Ашкином в 1971 г., широко применяется для изучения взаимодействия между биологическими молекулами (антигенами и антителами, ферментами и субстратами, нуклеиновыми кислотами и ферментами матричного синтеза, моторными белками) [11–13], при исследовании микротрубочек [14], эластичности клеточных мембран [15] и подвижности бактерий [16]. Метод основан на взаимодействии лазерного луча с отдельными микрочастицами (цельными клетками либо полимерными микросферами), когда на последние действует оптическая сила, позволяющая перемещать удерживаемый объект на точно заданное расстояние в горизонтальной или вертикальной плоскости. По хронограмме сигнала фотодетектора можно судить о силе связи бактериальной клетки со стеклянной подложкой, обработанной целевым веществом. Устройство лазерной ловушки и типовые модельные системы, применяемые в биохимии и микробиологии, подробно описаны в одном из наших обзоров [17].

В доступной литературе нет данных об использовании лазерного пинцета для изучения адгезии патогенных иерсиний к белкам соединительной ткани. Представлялось важным оценить влияние температуры культивирования на сродство к коллагену и фибронектину двух близкородственных, но резко различающихся по клинической картине заболевания видов – *Yersinia pseudotuberculosis* и *Yersinia pestis*. Первый вызывает острое воспаление тонкой кишки,

симптомы которого варьируют от умеренного гастроэнтерита с поражением брыжеечных лимфоузлов до септической формы с очагами во внутренних органах – чаще в суставах и печени. Болезнь имеет сезонный характер и связана с употреблением овощей осенне-зимнего хранения (картофель, морковь, капуста и т.д.), загрязненных выделениями грызунов.

Клиническая картина болезни, вызываемой *Y. pestis*, зависит от пути заражения. При укусе блохи развивается бубонная чума, протекающая с симптомами некротического лимфаденита. В этом случае гематогенная диссеминация приводит к септической форме с обсеменением крови, ДВС-синдромом и полиорганной недостаточностью. При аэрогенном заражении возникает легочная чума, отличающаяся молниеносным течением, геморрагической пневмонией и высокой заразностью.

**Цель** исследования состояла в оценке значимости коллагена и фибронектина в адгезии клеток *Y. pseudotuberculosis* O1b и вакцинного штамма *Y. pestis* EV НИИЭГ, выращенных при разной температуре, с использованием оптической ловушки.

### Материалы и методы

**Культивирование бактерий.** Штаммы иерсиний получены из коллекции ФКУН Российский противочумный институт «Микроб» Роспотребнадзора. Клетки *Y. pseudotuberculosis* O:1b (№ 474) выращивали на плотной питательной среде БТН (ООО «Биотехновация», Россия) при +10 и +37 °С в течение 10 дней и 48 ч соответственно (далее они обозначены как 1b-10 и 1b-37); клетки *Y. pestis* вакцинного штамма EV НИИЭГ культивировали на той же среде при +27 и +37 °С в течение 48 ч (далее они обозначены как EV-27 и EV-37). Бактериальную массу смывали фосфатным буферным раствором (ФБР), рН=7,2–7,4, тщательно суспендировали, доводя концентрацию клеток до  $1 \cdot 10^9$  мл<sup>-1</sup>.

**Сенсибилизация подложек белками соединительной ткани.** Чашки Fluorodish (WPI, США) предварительно выдерживали в эксикаторе с аргоном около 30 мин, затем в него помещали две небольшие пробирки с 30 мкл триэтиламина (ООО «Реахим», Россия) и 10 мкл 3-аминопропилтриэтоксисилана (Sigma, США). Спустя 1,5 ч чашки ставили в термостат и выдерживали при +60 °С в течение 1 ч. В охлажденные чашки последовательно вносили 33 мкл раствора N-гидроксисукцинимиды (Sigma, США) на ФБР (4,6 мг/мл), 95 мкл раствора солянокислого 1-этил-3-(3-диметиламинопропил) карбодиимида (Sigma, США) на ФБР (9,8 мг/мл), 500 мкл ФБР и необходимое количество раствора коллагена (с=7,5 мг/мл) либо фибронектина (с=1 мг/мл) (ООО «БиолоТ», Россия) до конечной концентрации каждого белка 100 мкг/мл. Контрольные чашки готовили по той же схеме, добавляя вместо целевых белков рассчитанное количество солевого раствора бычьего сывороточного альбумина (БСА)

(с=1 мг/мл) до конечной концентрации 100 мкг/мл. Инкубировали емкости в течение 48 ч при +8 °С, после чего пятикратно промывали дистиллированной водой и выдерживали при комнатной температуре до полного испарения влаги. Сухие чашки хранили в эксикаторе при температуре не выше +8 °С.

**Силовая спектроскопия.** Силу взаимодействия между клетками бактерий и целевыми белками измеряли с помощью лазерного пинцета JPK Nanotracker (JPK, Германия) на базе алюмоиттриевого граната, испускающего лучи с длиной волны 1064 нм. Перед опытом в чашку добавляли 2,5 мл ФБР и 3–5 мкл микробной взвеси, перемешивали и оставляли на 10–15 мин при комнатной температуре. Клетки захватывали лазером при мощности 2,5 Вт и вертикально подносили ко дну чашки с шагом 50 нм до наблюдения трех последовательных скачков на хронограмме сигнала. Спустя 1 секунду клетку отводили в полуавтоматическом режиме со скоростью ~ 150 нм/с до ее отрыва от подложки. Амплитуду скачка сигнала, отражающего отрыв микросферы от подложки, пересчитывали в единицы силы пН (пиконьютон) с учетом заранее определенных коэффициентов жесткости и чувствительности.

Расчет средних и медианных сил, а также доверительных интервалов проводили в программе Microsoft Excel 2016. Гистограммы распределения сил отрыва строили в MATLAB 2023 при ширине единичного диапазона 2 пН.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов выявил значимую роль коллагена в адгезии клеток *Y. pseudotuberculosis* 1b, выращенных при +37 °С (таблица). Средняя сила связи в этом случае составила 12,4 пН против 7,2 пН для тех же бактерий, выращенных при +10 °С. Сродство культур EV-27 и EV-37 к коллагену оказалось значительно ниже: соответственно 6,1 и 7,4 пН по среднему или 5,3 и 5,8 пН по медианному значению, что сравнимо с адгезией этих бактерий к фибронектину – 6,6 и 7,3 пН по среднему или 5,4 и 5,6 пН по медиане. Клетки «холодовой» культуры 1b-10 связывались со вторым белком, по-видимому, сильнее, чем с коллагеном, – 8,1 пН против 7,2 пН по среднему значению, однако разница между ними, равно как и между клетками EV-27 и EV-37 при их подведении к подложке, покрытой фибронектином, оказалась недостоверной для  $p=0,95$ . Стоит отметить, что сила связи бактерий 1b-10 с альбумином была более чем в два раза ниже по сравнению с тремя другими вариантами иерсиний: 2,0 пН против 4,3–4,7 пН по средним значениям и 1,4 пН против 3,3–3,6 пН по медиане.

Сказанное выше подтверждается отношением необратимых и нулевых опытов (таблица). Первые чаще регистрируются при подведении клеток 1b-37 к «коллагеновой» подложке: 22 % против 11 % для фибронектина и 7 % для БСА. В остальных группах

Силловые характеристики взаимодействия клеток *Y. pseudotuberculosis* и *Y. pestis* с белками соединительной ткани – коллагеном и фибронектиномForce characteristics of interaction between *Y. pseudotuberculosis* or *Y. pestis* and the proteins of the connective tissues – collagen and fibronectin

Клетки Cells	Белок Protein	Доля исходов опытов, % Proportion of events, %			$F_{\text{сред.}} \pm \text{CI99}$ , пН $F_{\text{mean}} \pm \text{CI99}$ , pN	Медиана, пН Median, pN	N
		Н	0	Р			
1b-10	Коллаген Collagen	5	76	19	$7,2 \pm 2,0$	6,1	65
	Фибронектин Fibronectin	6	79	15	$8,1 \pm 1,8$	5,9	50
	БСА BSA	5	83	12	$2,0 \pm 0,4$	1,4	68
1b-37	Коллаген Collagen	22	52	26	$12,4 \pm 0,9$	13,1	279
	Фибронектин Fibronectin	11	68	21	$7,6 \pm 1,0$	4,8	210
	БСА BSA	7	78	16	$4,7 \pm 0,9$	3,6	76
EV-27	Коллаген Collagen	9	76	15	$6,1 \pm 1,1$	5,3	64
	Фибронектин Fibronectin	8	70	22	$6,6 \pm 1,3$	5,4	82
	БСА BSA	5	73	22	$4,4 \pm 1,1$	3,3	77
EV-37	Коллаген Collagen	12	69	19	$7,4 \pm 0,8$	5,8	212
	Фибронектин Fibronectin	7	74	19	$7,3 \pm 1,0$	5,6	156
	БСА BSA	7	76	18	$4,3 \pm 0,6$	3,6	166

Примечания: Н – необратимое связывание; 0 – нулевые опыты (нет связывания); Р – опыты с отрывом;  $F_{\text{сред.}}$  – средняя сила отрыва; CI99 – доверительный интервал для  $p=0,99$  (3 $\sigma$ ); N – число опытов с отрывом.

Notes: Н – irreversible binding events; 0 – zero events (no binding); Р – rupture events;  $F_{\text{mean}}$  – mean interaction force; CI99 – confidence interval at  $p=0.99$  (3 $\sigma$ ); N – number of the rupture events

необратимы от 5 до 8 % опытов, и лишь в паре «EV-37 – коллаген» их доля повышается до 12 %. Более 50 % отведений были нулевыми независимо от типа клеток и сенситина подложек – их частота менялась от 52 % в группе «1b-37 – коллаген» до 80 % в контроле. Высокая частота «нулевых» опытов может объясняться неоднородностью молекулярного пейзажа на поверхности бактерий [18, 19]. С другой стороны, известно, что многие белки способны к агрегации и присутствуют в растворе не только в виде субъединиц, но и в виде более крупных комплексов [20], что определяет гетерогенность структуры функционализированной подложки. Эти факторы, по-видимому, и определяют достаточно широкий размах регистрируемой силы связи – от необратимых взаимодействий до «нулевых» опытов.

Сопоставление гистограмм убедительно свидетельствует об участии коллагена в адгезии клеток 1b-37. В этом случае наблюдается равномерное распределение событий по всей ширине диапазона сил с образованием слабого второго пика в области 14 пН (рис. 1, В) и полное отсутствие первого, характерного для прочих опытных групп и БСА (рис. 1, А, С–F).

Если в паре «1b-37 – коллаген» на долю событий с амплитудой до 6 пН приходится 14 % отведений, то в группах «1b-10 и 1b-37 – фибронектин» – уже 50 %, а при замене целевых белков на БСА – до 80–90 %.

Сила связи клеток *Y. pestis* с подложками, покрытыми двумя целевыми белками, практически одинакова (таблица). Гистограммы также имеют сходный характер (рис. 2). На всех графиках присутствует очевидный пик в области 4–6 пН и наблюдается плавное уменьшение частоты регистрации высокоамплитудных отрывов в области между 6 и 18–20 (24) пН.

Одним из адгезинов иерсиний можно считать липополисахарид (ЛПС), занимающий более половины площади наружной мембраны. Значимость ЛПС в адгезивности к эукариотическим клеткам нескольких типов показана для ряда видов грам-отрицательных бактерий, в том числе и для *Y. pestis* [21–23]. Более высокая сила связи всех четырех культур иерсиний (таблица) с подложками, покрытыми фибронектином и коллагеном, по сравнению с БСА позволяет предположить существенную роль их ЛПС во взаимодействии с указанными белками,

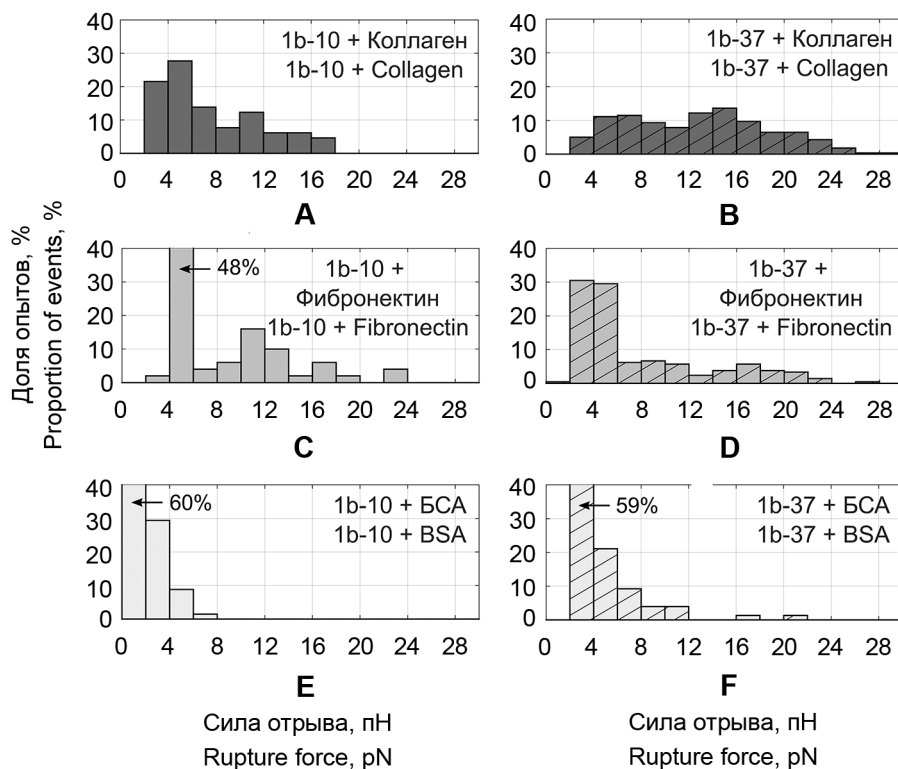


Рис. 1. Распределение сил отрыва при взаимодействии бактерий *Y. pseudotuberculosis* 1b, выращенных при +10 °С (А, С, Е) и +37 °С (В, D, F), с подложками, покрытыми белками

Примечание. Для наглядности гистограммы усечены по вертикали до отметки «40 %». Если доля опытов превышает 40 %, ее значение приводится справа от соответствующего столбца

Fig. 1. Distribution of interaction forces between *Y. pseudotuberculosis* 1b cells grown at +10 °С (A, C, E) or +37 °С (B, D, F) and the protein-coated glasses

Note. For clarity, histograms are vertically cut up to 40 % mark. If the proportion of events exceeds 40 %, its value is shown to the right of the column

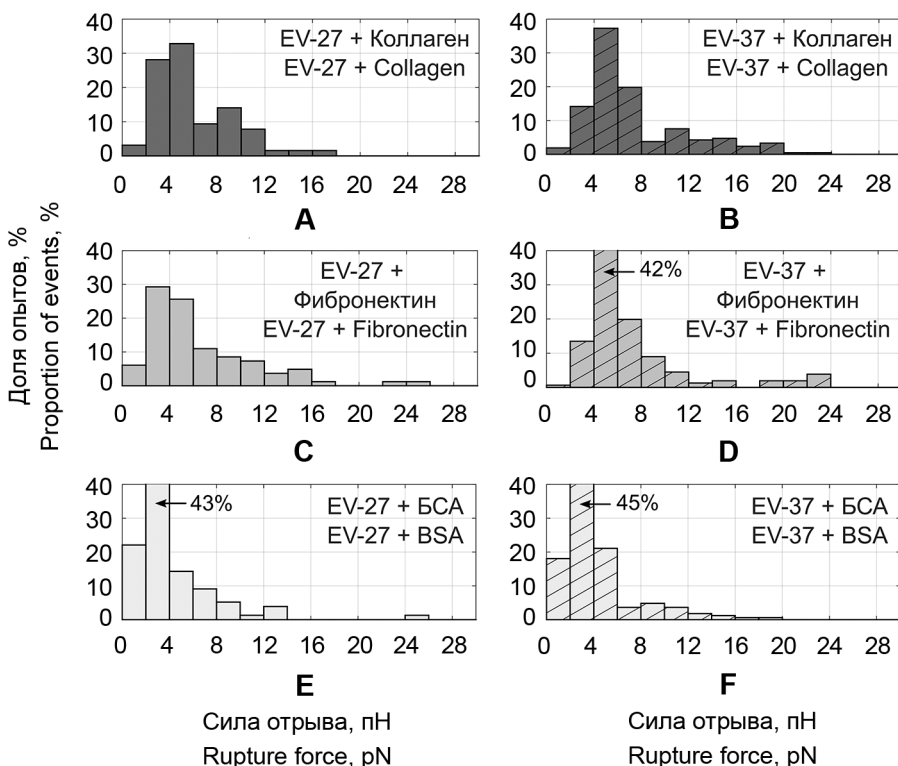


Рис. 2. Распределение сил отрыва при взаимодействии бактерий *Y. pestis* EV, выращенных при +27 °С (А, С, Е) и +37 °С (В, D, F), с подложками, покрытыми белками

Примечание. Для наглядности гистограммы усечены по вертикали до отметки «40 %». Если доля опытов превышает 40 %, ее значение приводится справа от соответствующего столбца

Fig. 2. Distribution of interaction forces between *Y. pestis* EV cells grown at +27 °С (A, C, E) or +37 °С (B, D, F) and the protein-coated glasses

Note. For clarity, histograms are vertically cut up to 40 % mark. If the proportion of events exceeds 40 %, its value is shown to the right of the column

но не позволяет судить об участии в этом процессе каждого из трех его компонентов (липид А, кора, полисахарида). Повышение температуры культивирования снижает оснащенность ЛПС *Y. pseudotuberculosis* О-боковыми цепями, что делает подлежащие белки наружной мембраны (в частности, порины) доступными для прямого, неспецифического свя-

звания с коллагеном, молекула которого несет регулярный аминокислотный мотив, отсутствующий у фибронектина и, возможно, опосредующий указанное взаимодействие. Как известно, адгезивность иерсиний к эукариотическим клеткам определяется несколькими поверхностными молекулами. Так, с помощью других методических подходов показа-

на значимость белков YapV, YapK, YapJ в адгезивности к коллагенам нескольких типов, ламинину, фибронектину [24]. Установлено также участие в связывании белка Ail *Y. pestis* с такими белками внеклеточного матрикса, как фибронектин, ламинин, гепарансульфат-протеогликан [25]. Для более глубокого понимания механизмов адгезии патогенных иерсиний к тканям макроорганизма необходимо проведение дальнейших исследований по оценке значимости в этих процессах отдельных поверхностных антигенов.

**Конфликт интересов.** Авторы подтверждают отсутствие конфликта финансовых/нефинансовых интересов, связанных с написанием статьи.

**Финансирование.** Авторы заявляют об отсутствии дополнительного финансирования при проведении данного исследования.

### References / Список литературы

- Zhao A., Sun J., Liu Y. Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 2023; 13:1137947. DOI: 10.3389/fcimb.2023.1137947.
- Osei-Owusu P., Charlton T.M., Kim H.K., Missiakas D., Schneewind O. FPR1 is the plague receptor on host immune cells. *Nature.* 2019; 574:57–62. DOI: 10.1038/s41586-019-1570-z.
- LaFoya B., Munroe J.A., Miyamoto A., Detweiler M.A., Crow J.J., Gazdik T., Albright A.R. Beyond the matrix: the many non-ECM ligands for integrins. *Int. J. Mol. Sci.* 2018; 19(2):449. DOI: 10.3390/ijms19020449.
- Santos A.L., Preta G. Lipids in the cell: organization regulates function. *Cell. Mol. Life Sci.* 2018; 75(11):1909–27. DOI: 10.1007/s00018-018-2765-4.
- Dzobo K., Dandara C. The extracellular matrix: its composition, function, remodeling, and role in tumorigenesis. *Biomimetics (Basel).* 2023; 8(2):146. DOI: 10.3390/biomimetics8020146.
- Sekiguchi R., Yamada K.M. Basement membranes in development and disease. *Curr. Top. Dev. Biol.* 2018; 130:143–91. DOI: 10.1016/bs.ctdb.2018.02.005.
- Tvaroška I. Glycosylation modulates the structure and functions of collagen: a review. *Molecules.* 2024; 29(7):1417. DOI: 10.3390/molecules29071417.
- Singh B., Fleury C., Jalalvand F., Riesbeck K. Human pathogens utilize host extracellular matrix proteins laminin and collagen for adhesion and invasion of the host. *FEMS Microbiol. Rev.* 2012; 36(6):1122–80. DOI: 10.1111/j.1574-6976.2012.00340.x.
- Bachman H., Nicosia J., Dysart M., Barker T.H. Utilizing fibronectin integrin-binding specificity to control cellular responses. *Adv. Wound Care (New Rochelle).* 2015; 4(8):501–11. DOI: 10.1089/wound.2014.0621.
- Vaca D.J., Thibau A., Schütz M., Kraiczky P., Happonen L., Malmström J., Kempf V.A.J. Interaction with the host: the role of fibronectin and extracellular matrix proteins in the adhesion of Gram-negative bacteria. *Med. Microbiol. Immunol.* 2020; 209(3):277–99. DOI: 10.1007/s00430-019-00644-3.
- Chen H.D., Ge K.K., Li Y.M., Wu J.G., Gu Y.Q., Wei H.M., Tian Z.G. Application of optical tweezers in the research of molecular interaction between lymphocyte function associated antigen-1 and its monoclonal antibody. *Cell. Mol. Immunol.* 2007; 4(3):221–5.
- Bustamante C.J., Chemla Y.R., Liu S., Wang M.D. Optical tweezers in single-molecule biophysics. *Nat. Rev. Methods Primers.* 2021; 1:25. DOI: 10.1038/s43586-021-00021-6.
- Al Azzam O., Watts J.C., Reynolds J.E., Davis J.E., Reinemann D.N. Probing myosin ensemble mechanics in actin filament bundles using optical tweezers. *J. Vis. Exp.* 2022; (183):e63672. DOI: 10.3791/63672.
- Gudimchuk N.B., Alexandrova V.V. Measuring and modeling forces generated by microtubules. *Biophys. Rev.* 2023; 15(5):1095–110. DOI: 10.1007/s12551-023-01161-7.
- Agrawal R., Smart T., Nobre-Cardoso J., Richards C., Bhatnagar R., Tufail A., Shima D., Jones P.H., Pavesio C. Assessment of red blood cell deformability in type 2 diabetes mellitus and diabetic retinopathy by dual optical tweezers stretching technique. *Sci. Rep.* 2023; 6:15873. DOI: 10.1038/srep15873.
- Altindal T., Chattopadhyay S., Wu X.L. Bacterial chemotaxis in an optical trap. *PLoS One.* 2011; 6(4):18231. DOI: 10.1371/journal.pone.0018231.
- Konyshov I., Byvalov A. Model systems for optical trapping: the physical basis and biological applications. *Biophys. Rev.* 2021; 13(4):515–29. DOI: 10.1007/s12551-021-00823-8.
- Munford R.S., Hall C.L., Rick P.D. Size heterogeneity of *Salmonella typhimurium* lipopolysaccharides in outer membranes and culture supernatant membrane fragments. *J. Bacteriol.* 1980; 144(2):630–40. DOI: 10.1128/jb.144.2.630-640.1980.
- Bramkamp M., López D. Exploring the existence of lipid rafts in bacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2015; 79(1):81–100. DOI: 10.1128/MMBR.00036-14.
- Dabirmanesh B., Khajeh K., Uversky V.N. Protein aggregation: an overview. *Prog. Mol. Biol. Transl. Sci.* 2024; 206:1–10. DOI: 10.1016/bs.pmbts.2024.03.007.
- Zhang P., Snyder S., Feng P., Azadi P., Zhang S., Bulgheresi S., Sanderson K.E., He J., Klena J., Chen T. Role of N-acetylglucosamine within core lipopolysaccharide of several species of gram-negative bacteria in targeting the DC-SIGN (CD209). *J. Immunol.* 2006; 177(6):4002–11. DOI: 10.4049/jimmunol.177.6.4002.
- Yang K., Park C.G., Cheong C., Bulgheresi S., Zhang S., Zhang P., He Y., Jiang L., Huang H., Ding H., Wu Y., Wang S., Zhang L., Li A., Xia L., Bartra S.S., Plano G.V., Skurnik M., Klena J.D., Chen T. Host Langerin (CD207) is a receptor for *Yersinia pestis* phagocytosis and promotes dissemination. *Immunol. Cell. Biol.* 2015; 93(9):815–24. DOI: 10.1038/icb.2015.46.
- Zhang P., Skurnik M., Zhang S.S., Schwartz O., Kalyanasundaram R., Bulgheresi S., He J.J., Klena J.D., Hinnebusch B.J., Chen T. Human dendritic cell-specific intercellular adhesion molecule-grabbing nonintegrin (CD209) is a receptor for *Yersinia pestis* that promotes phagocytosis by dendritic cells. *Infect. Immun.* 2008; 76(5):2070–9. DOI: 10.1128/IAI.01246-07.
- Nair M.K., De Masi L., Yue M., Galván E.M., Chen H., Wang F., Schifferli D.M. Adhesive properties of YapV and paralogous autotransporter proteins of *Yersinia pestis*. *Infect. Immun.* 2015; 83(5):1809–19. DOI: 10.1128/IAI.00094-15.
- Yamashita S., Lukacik P., Barnard T.J., Noinaj N., Felek S., Tsang T.M., Krukonis E.S., Hinnebusch B.J., Buchanan S.K. Structural insights into Ail-mediated adhesion in *Yersinia pestis*. *Structure.* 2011; 19(11):1672–82. DOI: 10.1016/j.str.2011.08.010.

### Authors:

Konyshov I.V., Dudina L.G., Byvalov A.A. Institute of Physiology, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 24, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; e-mail: info@frc.komisc.ru. Vyatka State University; 36, Moskovskaya St., Kirov, 610000, Russian Federation; e-mail: info@vyatsu.ru.

### Об авторах:

Коньшев И.В., Дудина Л.Г., Бывалов А.А. Институт физиологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Российская Федерация, 167982, Республика Коми, Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 24; e-mail: info@frc.komisc.ru. Вятский государственный университет; Российская Федерация, 610000, Киров, ул. Московская, 36; e-mail: info@vyatsu.ru.