

ОБЗОРНЫЕ
И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СТАТЬИ

УДК 579.252.59:579.842.14

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ГЕНОМНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМИДЫ
ВИРУЛЕНТНОСТИ *Salmonella enterica* ПОДВИД *enterica* СЕРОТИП Enteritidis

© 2019 г. А. В. Раков¹, *, Ф. Н. Шубин¹

¹Научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии
им. Г.П. Сомова, Владивосток, 690087 Россия

*e-mail: rakovalexey@gmail.com

Поступила в редакцию 16.03.2018 г.

После доработки 17.03.2018 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

Некоторые серотипы *Salmonella enterica* подвид *enterica* содержат серотипоспецифические плазмиды вирулентности. Доступность полных последовательностей плазмиды вирулентности *S. Enteritidis* (pSEV) позволила проследить ее эволюционные изменения. Нами были изучены плазмиды вирулентности *S. Enteritidis* из различных штаммов для выявления эволюции pSEV и определения предковой плазмиды и ее точного размера. Сравнение всех доступных последовательностей плазмид вирулентности *S. Enteritidis* показало, что они консервативны и ограничены в размерах. Эти размеры колебались от 59336 до 59374 пн, а более половины плазмид имели размер, равный 59372 пн. Генный состав плазмиды является консервативным и состоит из 81 открытой рамки считывания с небольшой псевдогенизацией плазмид, размер которой отличался от 59372 пн. Предполагается, что прототипом плазмиды вирулентности *S. Enteritidis* pSEV является плазида из SEJ-подобного предкового штамма с размером 56372 пн и таким же нуклеотидным и генным составом, как *S. Enteritidis* штамм SEJ. Последовательность данной плазмиды может быть использована в качестве референсной для всех будущих работ по плазмиде вирулентности *S. Enteritidis*.

Ключевые слова: *Salmonella* Enteritidis, сальмонелла, плазида вирулентности, секвенирование плазмид, геномика.

DOI: 10.1134/S0016675819020127

Salmonella enterica подвид *enterica* серотип Enteritidis (*S. Enteritidis*) остается первым по значимости серотипом в этиологии сальмонеллезной инфекции у человека во многих странах мира [1] и в том числе России. Широко известно, что некоторые серотипы *Salmonella enterica* подвид *enterica* содержат серотипоспецифические плазмиды вирулентности [2]. Общим для всех известных плазмид вирулентности *S. enterica* подвид *enterica* является оперон *spvRABCD* размером 7.8 тпн, необходимый для развития системной инфекции на животных моделях [3]. *S. Enteritidis* содержит плазмиду вирулентности размером 59 тпн, обозначенную pSEV (plasmid *Salmonella* Enteritidis Virulence) [4]. По данным 25-летнего мониторинга за *S. Enteritidis* в РФ, около 94% клинических штаммов и 89% штаммов из окружающей среды содержат плазмиду вирулентности (наши неопубликованные данные).

Поскольку плазмиды вирулентности сальмонелл имеют значительный размер, их копийность низка (2–3 копии на клетку) и поэтому они более стабильны по сравнению с плазмидами меньшего размера [5]. Напротив, некоторые авторы полага-

ют, что из-за малого числа копий плазмиды вирулентности их случайное распределение в дочерние клетки приводило бы к очень частой утрате плазмиды [6], однако этого не происходит. Гены на плазмиде вирулентности в основном хорошо охарактеризованы, но значимость некоторых из них до сих пор остается неясной.

У некоторых серотипов сальмонелл плазмиды вирулентности различны по размеру (например, *S. Choleraesuis* и *S. Dublin*) [4, 7]. Хорошо известно, что плазмиды вирулентности сальмонелл содержат специфичные репликоны FIB(S) и FII(S), которые представляют собой подгруппу плазмид IncF, без каких-либо генов антибиотикорезистентности [8]. В последние годы плазмиды, сочетающие в себе часть плазмиды вирулентности вместе с генами антибиотикорезистентности, обнаружены у некоторых серотипов сальмонелл (*S. Typhimurium*, *S. Enteritidis*, *S. Dublin*, *S. Choleraesuis*). Конъюгативные плазмиды, несущие кассеты вирулентности и антибиотикорезистентности, переносимые интегроном, были выделены в клинических изолятах *S. Typhimurium* [9]. Гибридная плазида вирулентности–антибиотикорезистентно-

сти *S. Enteritidis* pUO-SeVR1 была обнаружена в клинических изолятах из Испании в 2003 г. [10]. Показано, что в эволюции таких гибридных плазмид *S. Enteritidis* основную роль играет инсерционная последовательность IS26 [11]. Слияние R-плазмид с плазмидами вирулентности имеет большое значение для эволюции высоковирулентных и антибиотикорезистентных клонов *S. Enterica* [12].

Технологии секвенирования ДНК значительно продвинулись за последние десять лет, а экспоненциальный рост баз данных секвенированных геномов обеспечил возможность для сравнительного анализа геномных последовательностей. Тем не менее все еще существует проблема правильной аннотации геномов [13]. Большинство плазмидных и хромосомных последовательностей, доступных в GenBank, аннотировано автоматически без какой-либо последующей проверки. Этим продиктована необходимость в применении новых усовершенствованных методов для реаннотации с последующей проверкой перед выполнением любого сравнительного анализа геномов.

Предполагается, что *S. Enteritidis* приобрела плазмиду вирулентности путем горизонтального переноса от эволюционно далеких серотипов [14], но изучение эволюции плазмиды pSEV в *S. Enteritidis* до настоящего времени не было проведено. За последние несколько лет секвенированы плазмиды вирулентности из различных изолятов *S. Enteritidis* [15–17].

Цель данной работы – сравнительное изучение последовательностей плазмид вирулентности различных штаммов *S. Enteritidis* для оценки вариативности размеров и состава плазмиды вирулентности, нахождения возможного предка pSEV и определение ее точного размера.

Бактериальные штаммы и плазмиды. Полные последовательности плазмид вирулентности 13 штаммов *S. Enteritidis* были отобраны из базы нуклеотидов NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pnuccore/>) (табл. 1). Для целей сравнения в анализ были включены последовательности двух предположительно гибридных плазмид вирулентности–антибиотикорезистентности: pFORC7 (Acc. No. CP009767) и pSEN-BT (Acc. No. LN879484), из штаммов *S. Enteritidis* FORC_007 и D7795 соответственно [18], поскольку они имели в своем составе *srcA*-оперон. Для подтверждения принадлежности используемых штаммов к серотипу *S. Enteritidis* использован сайт SeqSero для проверки последовательности хромосомы, где это было возможно [19].

Реаннотация. Автоматическая реаннотация была выполнена с помощью программ GeneMarkS [20], Prodigal [21], AMIGene [22] и сервера

RAST [23]. Комбинация нескольких программ для автоматической аннотации с применением мажоритарной системы с проверкой вручную позволила повысить точность предсказаний [24, 25]. Инсерционные последовательности (IS-элементы) и гены антибиотикорезистентности определяли с помощью программ IS Finder [26] и ResFinder [27] соответственно. Определение группы несовместимости проводили на сервере PlasmidFinder [8].

Сравнительная геномика. Выравнивание последовательностей полных плазмид выполняли в программах Mauve [28] и Kalign2 [29]. Транслированные кодирующие последовательности сравнивали с последовательностями известных белков с использованием BLASTP [30]. Ортологи определяли как транслированные кодирующие последовательности с гомологией >90% с известными последовательностями белков в базе данных NCBI. Филогенетическое родство плазмид выявляли с помощью программы MEGA6 [31].

Секвенирование ДНК показало, что точный размер плазмид вирулентности *S. Enteritidis* варьирует от 59336 до 59374 пн. Более половины плазмид (7 из 13) имели размер 59372 пн. Эти данные соответствуют описанным ранее, в которых было установлено, что размер pSEV составляет 59372 пн [12]. Нами было показано, что размер может изменяться в определенных пределах, в зависимости от наличия инделов. Все исследованные плазмиды имели два специфичных для плазмид вирулентности сальмонелл репликаона – FIB(S) и FII(S) [8].

После множественного выравнивания с помощью программ Mauve и Kalign2 было установлено, что плазмиды вирулентности из генома *S. Enteritidis* SEJ идентичны консенсусной последовательности и использовались в последующем в качестве референсной, что положительным образом повлияло на качество результатов реаннотации. Для автоматической реаннотации использованы четыре программы: GeneMarkS, Prodigal, AMIGene и RAST. Число выявленных открытых рамок считывания (ORF) приведено в табл. 1. Наименьшее число ORF было получено при использовании AMIGene, а наибольшее – при использовании RAST. Мы сравнили результаты оригинальной аннотации с полученной нами реаннотацией с применением мажоритарного подхода для более корректного определения позиции старт-кодонов выявленных ORF. Число ORF для плазмид вирулентности размером 59372 пн определено нами как 81, в то время как в оригинальных аннотациях оно значительно колебалось – от 62 (для плазмиды штамма pCFSAN000006) до 103 (для плазмиды штамма pSLA5). Два генома плазмиды вирулентности (штаммы OLF-SE2-98984-6 и

Таблица 1. Штаммы и плазмиды *S. Enteritidis*, использованные в работе

Обозначение плазмид	Обозначение штамма	Размер, пн	Число генов NCBI (CDS)	Число генов (реаннотация: GeneMark/AMIGene/Prodigal/RAST)	Число генов (majority vote)/ Псевдогенов	Номер в GenBank	Источник получения	Страна	Год	Литературный источник	Группа несовместимости
Нет	SEJ	59372	75/77	89/74/78/108	81/0	CP008927	н.д.	н.д.	н.д.	[15]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
Нет	Durban	59372	75	89/74/78/108	81/0	CP007508	Большой	Южная Африка	2013	[32]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSEN	P125109	59372	70	90/74/79/109	81/0	HG970000	н.д.	н.д.	н.д.	[33]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
н.д.	OLF-SE2-98984-6	59372	N/A	88/74/78/108	81/0	CP011840	Окр. среда	Канада	2000	[16]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
н.д.	OLF-SE3-98983-4	59372	N/A	90/74/78/108	81/0	CP011843	Окр. среда	Канада	2000	[16]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSE9-641	EC20090641	59372	71	89/74/78/108	81/0	KT317611	Куры	Канада	2008	[17]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSE12-5	EC20120005	59372	71	88/74/78/107	81/0	KT317613	Куры	Канада	2011	[17]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pCMCC 50041	CMCC50041	59373	75/71	90/75/79/109	80/1	CP013098	н.д.	Дания	н.д.	[34]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSLA5	LA5	59374	103	92/76/81/109	77/4	HE663166	Куры	н.д.	н.д.	[35]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
plasmid00	CDC_2010K_0968	59369	75/71	89/74/76/107	79/2	CP007529	н.д.	США	2010	[36]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSENV	LK5	59368	84	91/74/77/105	80/1	JN885080	н.д.	н.д.	н.д.	[14]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSE12-2	EC20120002	59363	73	88/75/83/106	80/1	KT317612	Куры	Канада	2012	[17]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pCFSAN 000006	18569	59336	62/75	95/77/87/113	73/8	CP011395	Куры	Мексика	н.д.	[36]	IncFII(S)/ IncFIB(S)
pSEN-BT	D7795	85310	108	116/110/112/145	н.д.	LN879484	Большой	Малави	н.д.	[18]	IncFII(S)/ IncFIB(S)/ IncFIB(S)
pFORC7	FORC_007	101428	131	131/125/124/148	н.д.	CP009767	Морепродукт	Южная Корея	2014	Lee*, 2015	IncQ1 IncFIB(S)/ IncX1

Примечание. н.д. – нет данных. * Не опубликовано.

Таблица 2. Кодлируемые последовательности (открытые рамки считывания) плазмиды вирулентности штамма *S. Enteritidis* SEJ

Номер п.п.	Расположение кодирующих последовательностей (в пн) от точки начала репликации	Ген (гомолог или синоним)	Кодируемый продукт
1	463...624		Резольваза
2	712...966	<i>ygiW</i>	Предполагаемый белок внутренней мембраны
3	1770...2072	<i>pefB(papB)</i>	Регуляторный белок основной субъединицы фимбрий
4	2347...2871	<i>pefA</i>	Основная субъединица фимбрий
5	3098...5506	<i>pefC(fimD)</i>	Ашер-белок фимбрий
6	5499...6191	<i>pefD(faeE)</i>	Шаперон фимбрий
7	6209...6766		Предполагаемый белок внутренней мембраны
8	6856...7803		Гипотетический белок
9	8063...8275	<i>pefI</i>	Регулятор транскрипции FaeA-подобного семейства
10	8260...8610	<i>rcsB</i>	Регулятор транскрипции GerE-подобного семейства
11	8589...8732		Гипотетический белок
12	8854...9510	<i>srgA</i>	Белок бисульфидного обмена DsbA
13	9697...10542	<i>yaeT</i>	Белок наружной мембраны YaeT
14	10632...11189	<i>rck</i>	Белок наружной мембраны Rck
15	11455...12201	<i>envY(gadX)</i>	Терморегуляторный порин EnvY
16	12298...12519		Белок наружной мембраны
17	13375...14244	<i>repA</i>	Инициатор репликации плазмиды incFII семейства RepA
18	14564...14809		Репликативный белок
19	15009...15188		Фосфолипаза D
20	15205...15489	<i>nuc</i>	Эндонуклеаза
21	15611...16063	<i>dsbA</i>	Оксидоредуктаза DsbA
22	16180...16602	<i>finO</i>	Белок ингибирования конъюгации IncF плазмиды FinO
23	16864...17196	<i>traV</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraV
24	17193...17408	<i>trbD</i>	Белок конъюгационного переноса TrbD
25	17395...17991	<i>traP</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraP
26	17981...19402	<i>traB</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraB
27	19402...20142	<i>traK</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraK (секретин)
28	20129...20695	<i>traE</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraE
29	20717...21028	<i>traL</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraL
30	21043...21405	<i>traA</i>	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraA
31	21447...21629	<i>traY</i>	Регулятор системы конъюгации IncF плазмиды TraY
32	21768...22139	<i>traJ</i>	Регулятор системы конъюгации IncF плазмиды TraJ
33	22647...23027	<i>traM</i>	Белок передачи сигнала скрещивания для конъюгации IncF плазмиды TraM
34	23020...23226		Гипотетический белок
35	23443...23913		Литическая транс-гликозилаза
36	24436...24726	<i>yubP</i>	Гипотетический белок
37	24773...25042		Гипотетический белок
38	25552...26151	<i>psiA</i>	Белок ингибирования SOS-репарации
39	26145...26309	<i>psiB</i>	Белок ингибирования SOS-репарации

Таблица 2. Окончание

Номер п.п.	Расположение кодирующих последовательностей (в пн) от точки начала репликации	Ген (гомолог или синоним)	Кодируемый продукт
40	26352...28049	<i>parB</i>	Белок деления плазмиды ParB
41	28374...28796	<i>umuD(lexA)</i>	Репаративный белок UmuD
42	28796...30070	<i>umuC(dinB1)</i>	Репаративный белок UmuC
43	30152...31126	<i>parB(virB)</i>	Белок деления плазмиды ParB
44	31126...32331	<i>parA</i>	Белок деления плазмиды ParA
45	32746...33687		Транспозаза
46	33684...34289		Гипотетический белок
47	34346...34747		Гипотетический белок
48	34865...35374	<i>yacC</i>	Экзонуклеаза
49	35367...36482	<i>tlpA(smC)</i>	Суперспиральный белок TlpA
50	36740...37228		Предполагаемый цитоплазматический белок
51	37883...38623	<i>cynT</i>	Углеродная ангидраза
52	38830...39390	<i>rlgA(hin)</i>	Резольваза RlgA
53	39374...41038		Транспозаза IS481
54	41028...41996	<i>exeA</i>	АТФаза (системы секреции II типа)
55	42185...43222		Транспозаза IS630
56	43430...43555		Гипотетический белок
57	43830...44723	<i>spvR(mkaC)</i>	Активатор транскрипции генов вирулентности spv
58	44897...45061	<i>rrrD</i>	Лизоцим профага Gifsy-2 RrrD
59	45235...46002	<i>spvA(mkaB)</i>	Вирулентный белок SpvA
60	46184...47959	<i>spvB</i>	Актин-АДФ-рибозилтрансфераза SpvB
61	48240...48965	<i>spvC(ospF)</i>	Фосфотрининлиаза SpvC
62	49227...49877	<i>spvD</i>	Вирулентный белок SpvD
63	50004...50429		Транспозаза IS200
64	50486...50836		Транспозаза IS605
65	50903...51319		Инвазин/интимин
66	51343...51888	<i>lysM</i>	Пептидогликан-связывающий белок LysM
67	51619...51906		Гипотетический белок
68	51986...52156		Гипотетический белок
69	52183...52668		Белок внутренней мембраны
70	52662...53150		Регулятор транскрипции семейства CaiF/GrlA
71	53175...53888	<i>yahA</i>	Дигуанилатциклаза/фосфодиэстераза
72	53897...54679	<i>xerD</i>	Тирозин-рекомбиназа
73	54714...55235		Предполагаемый цитоплазматический белок
74	55232...55522		Цитоплазматический белок
75	55524...55829	<i>ccdB</i>	Токсин CcdB
76	55831...56049	<i>ccdA</i>	Антитоксин CcdA
77	56376...56504		Гипотетический белок
78	56758...57246		Гипотетический белок
79	57380...57604		Гипотетический белок
80	57730...57918		Предполагаемый цитоплазматический белок
81	59148...59267		Гипотетический белок

Таблица 3. Список мутаций в генах исследованных плазмид вирулентности *S. Enteritidis*

Обозначение штамма	Обозначение белка (в SEJ)	Замена аминокислоты (позиция в пн)/индел (позиция в пн)	Возможный эффект
Durban	–	–	–
OLF-SE2-98984-6	–	–	–
OLF-SE3-98983-4	–	–	–
EC20090641	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraB	V18568I	Функциональный белок
EC20120002	Гипотетический белок	15980delGATTTCCA Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
CDC_2010K_0968	Регулятор транскрипции FaeA-подобного семейства	8128delCG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
CDC_2010K_0968	Гипотетический белок	9540delC Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
CMCC50041	Интеграза	E42,707R Q42,747S	Возможно функциональный белок
CMCC50041	Активатор транскрипции генов вирулентности <i>spv</i>	44537insG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
EC20120005	Белок бисульфидного обмена DsbA	T9,206M G9,212D R9,251H A9,287G S9,427G	Возможно функциональный белок
EC20120005, LA5, P125109, 18569	Гипотетический белок	L9,543P A9,580T	Возможно функциональный белок
LA5, P125109, 18569	Гипотетический белок	G6,952S	Функциональный белок
LA5	Гипотетический белок	7349insA Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
LA5	Белок бисульфидного обмена DsbA	9253insCCCG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
LA5, P125109, 18569	Белок наружной мембраны YaeT	D10,125N R10,234Q A10,366D D10,384G	Возможно функциональный белок
LA5, P125109, 18569	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraE	I20,165N	Возможно функциональный белок
LA5	Гипотетический белок	23052insN Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
LA5, P125109, 18569	Гипотетический белок	E40,984K	Функциональный белок
LA5	Актин-АДФ-рибозил-трансфераза SpvB	46386delC Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Белок системы конъюгации IncF плазмиды TraB	18781insG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Белок передачи сигнала скрещивания для конъюгации IncF плазмиды TraM	22874delC Сдвиг рамки	Нефункциональный белок

Таблица 3. Окончание

Обозначение штамма	Обозначение белка (в SEJ)	Замена аминокислоты (позиция в пн)/индел (позиция в пн)	Возможный эффект
18569	Белок ингибирования SOS-репарации psiA	25688insG 25923insT 25966delC 26006delGGCA 26022delG 26037delGC 26088delAGGC 26114delTTAA Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Белок ингибирования SOS-репарации psiB	26247delTGGGG 26260delA 26270delG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Белок деления плазмиды ParB	26721insTTT 26939delGC 27165delC GT27,408delC 27779delCAG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Репаративный белок UmuD	28422delG 28512delG 28630delC 28699delC 28720delG Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Репаративный белок UmuC	29358delG 29492delC 29704delC 29940delG 30069delA Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
18569	Белок деления плазмиды ParA	31286insG 31348insT Сдвиг рамки	Нефункциональный белок
LK5	Гипотетический белок	A4,124V	Функциональный белок
LK5	Регулятор транскрипции FaeA-подобного семейства	G8,123D 8125delGCG(H) H8,199Q	Нефункциональный белок
LK5	АТФаза (системы секреции II типа)	V41,981L	Функциональный белок

OLF-SE3-98983-4) были изначально депонированы неаннотированными, а также не имели названия для плазмид вирулентности. Кроме того, не было обнаружено никаких различий по нуклеотидному составу среди обеих плазмид. Список 81 ORF (предполагаемых кодирующих последова-

тельностью) представлен в табл. 2. Из них белки с известной функцией составили 54 (66.7%), предполагаемые и гипотетические белки – 19 (23.4%) и мобильные элементы – 8 (9.9%). Поиск гомологов подтвердил наличие следующих кластеров (оперонов) генов: *pef*-оперон (плазмид-кодируе-

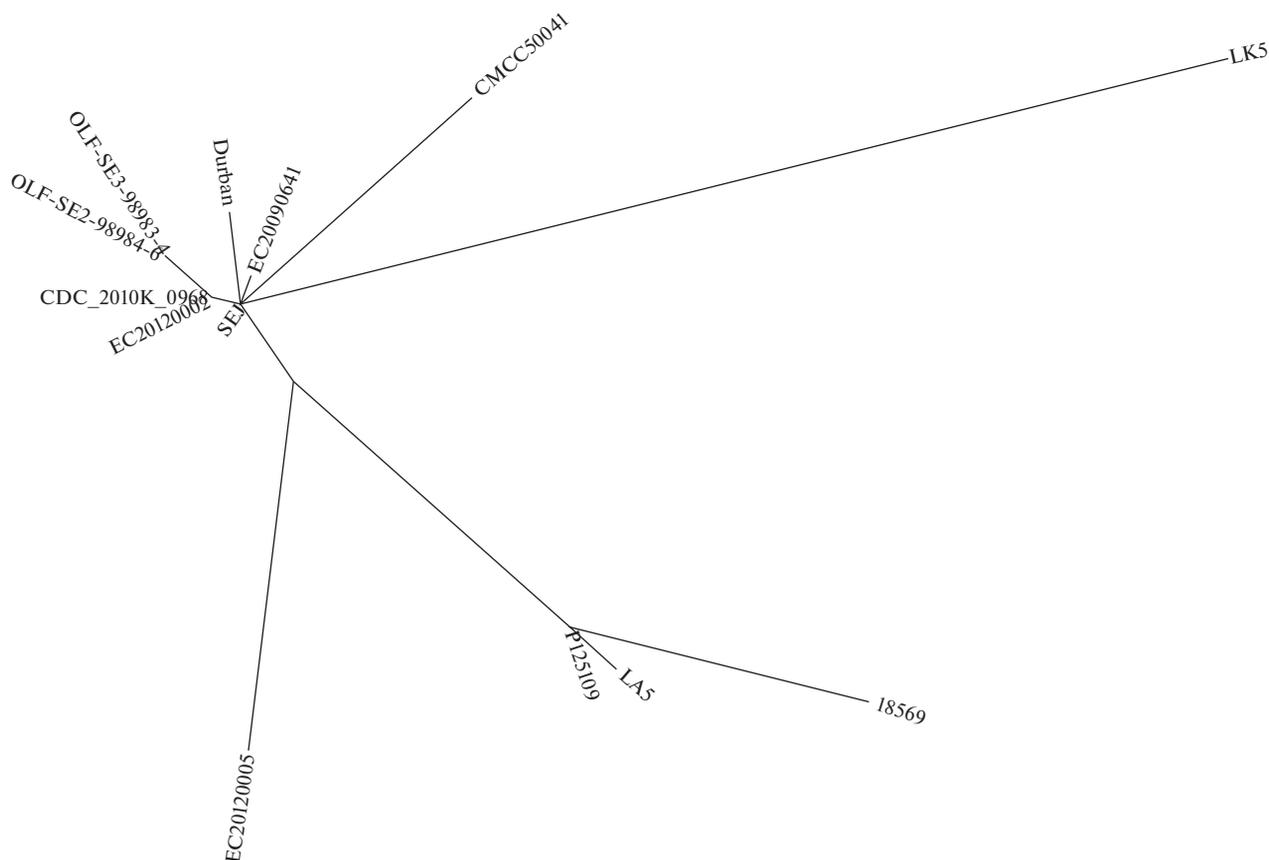


Рис. 1. Неукорененное ММП-дерево, показывающее родство исследованных плазмид вирулентности штаммов *S. Enteritidis*.

мые фимбрии), неполный *tra*-оперон [5], *spv*-оперон, а также гены, кодирующие белки деления плазмиды (*parA/parB*), белки, участвующие в SOS-репарации (*psiA/psiB*, *umuC/umuD*), и белки системы токсин—антитоксин II типа (*ccdA/ccdB*).

Сравнение геномов показало, что плазмиды вирулентности из нескольких штаммов *S. Enteritidis* имели мутации (сдвиг рамки считывания), которые могут приводить к возможному образованию псевдогенов. В табл. 3 приведен список замен аминокислот и их возможный эффект на трансляцию белка. Плазмиды *S. Enteritidis* штаммов Durban, OLF-SE2-98984-6, OLF-SE3-98983-4 имели только мутации в межгенных регионах и не имели мутаций, которые могли бы повлиять на состав белков. Поэтому функционально они являются такими же, как и *S. Enteritidis* штамм SEJ, и имеют такой же размер.

Гибридная плаزمида pSEN-BT из штамма *S. Enteritidis* D7795 содержит репликоны FIB(S) и FII(S), а также репликон IncQ1. Она имеет часть генов плазмиды вирулентности вместе с детерминантами антибиотикорезистентности для аминогликозидов (*strAB*), бета-лактамов (*blaTEM-1B*), сульфаниламидов (*sul1* и *sul2*), тетрациклина

(*tetA*) и триметоприма (*dfrA7*). Гибридная плазмида pFORC7 из штамма *S. Enteritidis* FORC_007 содержит только один репликон FIB(S) от плазмиды вирулентности и репликон IncX1. Однако нам не удалось обнаружить какие-либо детерминанты антибиотикорезистентности в плазмиде pFORC7 (табл. 1).

Полные последовательности 13 плазмид pSEV использовали для построения дерева по алгоритму максимального правдоподобия (ММП) в программе MEGA6 [31]. Неукорененное ММП-дерево показало, что предком плазмиды вирулентности в центре дерева является последовательность, идентичная последовательности *S. Enteritidis* штамма SEJ (рис. 1). Это подтверждает данные о том, что данная плазмиды идентична консенсусной при множественном выравнивании. Кроме того, она не имеет мутаций и псевдогенов при сравнении с остальными 12 последовательностями плазмид. Из дерева видно, что две наиболее генетически отдаленные плазмиды это плазмиды вирулентности штаммов *S. Enteritidis* 18569 и LK5.

Сравнение всех доступных к настоящему времени последовательностей плазмиды вирулентности *S. Enteritidis* показало, что они ограничены

в размерах. Эти размеры варьируют от 59336 до 59374 пн, при этом более половины плазмид имеют размер, равный 59372 пн. Состав генов является довольно консервативным и состоит из 81 открытой рамки считывания с признаками псевдогенизации некоторых генов у плазмид, отличающихся по размеру от 5972 пн.

Таким образом, можно утверждать, что предком плазмиды вирулентности *S. Enteritidis* (pSEV) является плазида из SEJ-подобного штамма [15] размером 56372 пн с таким же нуклеотидным и геным составом, как и *S. Enteritidis* штамм SEJ. Последовательность этой плазмиды может быть использована как референсная плазида вирулентности pSEV для всех последующих работ с использованием плазмиды вирулентности *S. Enteritidis*.

Таким образом, установлено, что плазида вирулентности *S. Enteritidis* (pSEV) является консервативной, что затрудняет использование ее в качестве молекулярно-генетического маркера в методах, основанных на ПЦР и секвенировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hendriksen R.S., Vierira A.R., Karlsmose S. et al. Global monitoring of *Salmonella* serovar distribution from the World Health Organization Global Foodborne Infections Network Country Data Bank: results of quality assured laboratories from 2001 to 2007 // *Foodborne Pathog. Dis.* 2011. V. 8. № 8. P. 887–900. doi 10.1089/fpd.2010.0787
- Popoff M.Y., Miras I., Coynault C. et al. Molecular relationships between virulence plasmids of *Salmonella* serotypes typhimurium and dublin and large plasmids of other *Salmonella* serotypes // *Ann. Microbiol. (Paris)*. 1984. V. 135A. № 3. P. 389–398.
- Gulig P.A., Danbara H., Guiney D.G. et al. Molecular analysis of spv virulence genes of the *Salmonella* virulence plasmids // *Mol. Microbiol.* 1993. V. 7. № 6. P. 825–830.
- Chu C., Hong S.F., Tsai C. et al. Comparative physical and genetic maps of the virulence plasmids of *Salmonella enterica* serovars typhimurium, enteritidis, choleraesuis, and dublin // *Infect. Immun.* 1999. V. 67. № 5. P. 2611–2614.
- Rotger R., Casadesús J. The virulence plasmids of *Salmonella* // *Int. Microbiol.* 1999. V. 2. № 3. P. 177–184.
- Sengupta M., Austin S. Prevalence and significance of plasmid maintenance functions in the virulence plasmids of pathogenic bacteria // *Infect. Immunol.* 2011. V. 79. № 7. P. 2502–2509. doi 10.1128/IAI.00127-11
- Chu C., Feng Y., Chien A.C. et al. Evolution of genes on the *Salmonella* Virulence plasmid phylogeny revealed from sequencing of the virulence plasmids of *S. enterica* serotype Dublin and comparative analysis // *Genomics*. 2008. V. 92. № 5. P. 339–343. doi 10.1016/j.ygeno.2008.07.010
- Carattoli A., Zankari E., García-Fernández A. et al. *In silico* detection and typing of plasmids using Plasmid-Finder and plasmid multilocus sequence typing // *Antimicrob. Agents Chemother.* 2014. V. 58. № 7. P. 3895–3903. doi 10.1128/AAC.02412-14
- Guerra B., Soto S., Helmuth R. et al. Characterization of a self-transferable plasmid from *Salmonella enterica* serotype typhimurium clinical isolates carrying two integron-borne gene cassettes together with virulence and drug resistance genes // *Antimicrob. Agents Chemother.* 2002. V. 46. № 9. P. 2977–2981.
- Rodríguez I., Guerra B., Mendoza M.C. et al. pUO-SeVR1 is an emergent virulence-resistance complex plasmid of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis // *J. Antimicrob. Chemother.* 2011. V. 66. № 1. P. 218–220. doi 10.1093/jac/dkq386
- García V., García P., Rodríguez I. et al. The role of IS26 in evolution of a derivative of the virulence plasmid of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis which confers multiple drug resistance // *Infect. Genet. Evol.* 2016. V. 45. P. 246–249. doi 10.1016/j.meegid.2016.09.008
- Rychlik I., Gregorova D., Hradecka H. Distribution and function of plasmids in *Salmonella enterica* // *Vet. Microbiol.* 2006. V. 112. № 1. P. 1–10.
- Schnoes A.M., Brown S.D., Dodevski I. et al. Annotation Error in Public Databases: Misannotation of Molecular Function in Enzyme Superfamilies // *PLoS Comput. Biol.* 2009. V. 5. № 12. P. e1000605. doi 10.1371/journal.pcbi.1000605
- Feng Y., Liu J., Li Y.G. et al. Inheritance of the *Salmonella* virulence plasmids: mostly vertical and rarely horizontal // *Infect. Genet. Evol.* 2012. V. 12. № 5. P. 1058–1063. doi 10.1016/j.meegid.2012.03.004
- Bishop-Lilly K.A., Frey K.G., Daligault H.E. et al. Complete genome sequence of *Salmonella enterica* subsp. *enterica* serovar Enteritidis Strain SEJ // *Genome Announc.* 2014. V. 2. № 5. P. e01084–14. doi 10.1128/genomeA.01084-14
- Ogunremi D., Devenish J., Amoako K. et al. High resolution assembly and characterization of genomes of Canadian isolates of *Salmonella* Enteritidis // *BMC Genomics*. 2014. V. 15. P. 713. doi 10.1186/1471-2164-15-713
- Rehman M.A., Ziebell K., Nash J.H. et al. Complete genome sequences of 16 Canadian strains of *Salmonella enterica* subsp. *enterica* serovar Enteritidis // *Genome Announc.* 2014. V. 2. № 2. P. e00330–14. doi 10.1128/genomeA.00330-14
- Feasey N.A., Hadfield J., Keddy K.H. et al. Distinct *Salmonella* Enteritidis lineages associated with enterocolitis in high-income settings and invasive disease in low-income settings // *Nat. Genet.* 2016. V. 48. № 10. P. 1211–1217. doi 10.1038/ng.3644
- Zhang S., Yin Y., Jones M.B. et al. *Salmonella* serotype determination utilizing high-throughput genome sequencing data // *J. Clin. Microbiol.* 2015. V. 53. № 5. P. 1685–1692. doi 10.1128/JCM.00323-15
- Besemer J., Lomsadze A., Borodovsky M. GeneMarkS: a self-training method for prediction of gene starts in microbial genomes. Implications for finding sequence motifs in regulatory regions // *Nucl. Acids Res.* 2001. V. 29(12). P. 2607–2618.
- Hyatt D., Chen G.L., Locascio P.F. et al. Prodigal: prokaryotic gene recognition and translation initiation site

- identification // BMC Bioinformat. 2010. V. 11. P. 119. doi 10.1186/1471-2105-11-119
22. *Bocs S., Cruveiller S., Vallenet D. et al.* AMIGene: Annotation of Microbial Genes // Nucl. Acids Res. 2003. V. 31. № 13. P. 3723–3726.
 23. *Aziz R.K., Bartels D., Best A.A. et al.* The RAST Server: rapid annotations using subsystems technology // BMC Genomics. 2008. V. 9. P. 75. doi 10.1186/1471-2164-9-75
 24. *Ederveen T.H., Overmars L., van Hijum S.A.* Reduce manual curation by combining gene predictions from multiple annotation engines, a case study of start codon prediction // PLoS One. 2013. V. 8. № 5. P. e63523. doi 10.1371/journal.pone.0063523
 25. *Wall M.E., Raghavan S., Cohn J.D. et al.* Genome majority vote improves gene predictions // PLoS Comput. Biol. 2011. V. 7. № 11. P. e1002284. doi 10.1371/journal.pcbi.1002284
 26. *Siguier P., Perochon J., Lestrade L. et al.* ISfinder: the reference centre for bacterial insertion sequences // Nucl. Acids Res. 2006. V. 34. P. D32–36. doi 10.1093/nar/gkj014
 27. *Zankari E., Hasman H., Cosentino S. et al.* Identification of acquired antimicrobial resistance genes // J. Antimicrob. Chemother. 2012. V. 67. № 11. P. 2640–2644. doi 10.1093/jac/dks261
 28. *Darling A.C., Mau B., Blattner F.R. et al.* Mauve: multiple alignment of conserved genomic sequence with rearrangements // Genome Res. 2004. V. 14. № 7. P. 1394–1403. doi 10.1101/gr.2289704
 29. *Lassmann T., Frings O., Sonnhammer E.L.* Kalign2: high-performance multiple alignment of protein and nucleotide sequences allowing external features // Nucl. Acids Res. 2009. V. 37. № 3. P. 858–865. doi 10.1093/nar/gkn1006
 30. *Altschul S.F., Gish W., Miller W. et al.* Basic local alignment search tool // J. Mol. Biol. 1990. V. 215. № 3. P. 403–410. doi 10.1016/S0022-2836(05)80360-2
 31. *Tamura K., Stecher G., Peterson D. et al.* MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 6.0 // Mol. Biol. Evol. 2013. V. 30. № 12. P. 2725–2729. doi 10.1093/molbev/mst197
 32. *Russell D.A., Bowman C.A., Hatfull G.F.* Genome sequence of *Salmonella enterica* subsp. *enterica* Strain Durban // Genome Announc. 2014. V. 2. № 3. P. e00399–14. doi 10.1128/genomeA.00399-14
 33. *Langridge G.C., Fookes M., Connor T.R. et al.* Patterns of genome evolution that have accompanied host adaptation in *Salmonella* // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 2015. V. 112. № 3. P. 863–868. doi 10.1073/pnas.1416707112
 34. *Li Q., Wang X., Yin K. et al.* Genetic analysis and CRISPR typing of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis from different sources revealed potential transmission from poultry and pig to human // Int. J. Food Microbiol. 2018. V. 266. P. 119–125. doi 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.11.025
 35. *Grépinet O., Rossignol A., Loux V. et al.* Genome sequence of the invasive *Salmonella enterica* subsp. *enterica* serotype enteritidis strain LA5 // J. Bacteriol. 2012. V. 194. № 9. P. 2387–2388. doi 10.1128/JB.00256-12
 36. *Allard M.W., Luo Y., Strain E. et al.* On the evolutionary history, population genetics and diversity among isolates of *Salmonella* Enteritidis PFGE pattern JEGX01.0004 // PLoS One. 2013. V. 8. № 1. P. e55254. doi 10.1371/journal.pone.0055254

Comparative Genomics Analysis of the *Salmonella enterica* subsp. *Enterica* Serotype Enteritidis Virulence Plasmid

A. V. Rakov^{a,*} and F. N. Shubin^a

^a*Somov Institute of Epidemiology and Microbiology, Vladivostok, Russia*

*e-mail: rakovalexey@gmail.com

Some serotypes of the *Salmonella enterica* subsp. *enterica* contain serovar-specific virulence plasmids that play a role in virulence for host organism. The availability of complete sequences of the *S. Enteritidis* virulence plasmid (pSEV) allowed us to trace its evolutionary changes. The aim of this work was to study the virulence plasmids of *S. Enteritidis* from various strains to identify the possible evolution of pSEV and to determine the possible ancestral plasmid and its exact size. Comparison of all available sequences of *S. Enteritidis* virulence plasmids showed that they are conservative and limited in size. Their size ranged from 59,336 to 59,374 bp, and more than half of the plasmids had a size of 59,372 bp. The gene content of the plasmid is conservative and consists of 81 open reading frames with moderate pseudogenization of plasmids, whose size was different from 59,372 bp. It is suggested that the prototype of the *S. Enteritidis* virulence plasmid pSEV is a plasmid from a SEJ-like ancestral strain with a size of 56,372 bp and the same nucleotide and gene content as *S. Enteritidis* strain SEJ. The sequence of this plasmid can be used as a reference for all further studies on the *S. Enteritidis* virulence plasmid.

Keywords: *Salmonella* Enteritidis, *Salmonella*, virulence plasmid, plasmid sequencing, genomics.