



Выявление возбудителей клещевых трансмиссивных инфекций в иксодовых клещах, удаленных после присасывания к человеку, на территории Хабаровского края в эпидемические сезоны 2017–2024 гг.

Н.В. Белкина, А.Г. Драгомерецкая, О.Е. Троценко, Т.А. Аушева

ФБУН «Хабаровский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии»
Роспотребнадзора, ул. Шевченко, д. 2, г. Хабаровск, 680610, Российская Федерация

Резюме

Введение. На территории Хабаровского края локализуются сочетанные природные очаги клещевых трансмиссивных инфекций, характеризующиеся стойкостью и цикличностью функционирования. Из 19 административных территорий края 16 являются эндемичными по вирусному клещевому энцефалиту и другим клещевым инфекциям. В связи с вышеизложенным неотъемлемым элементом эпидемиологического надзора за данной группой инфекций является мониторинг показателей обилия, видового состава и инфицированности иксодовых клещей возбудителями клещевых трансмиссивных инфекций.

Цель исследования: анализ показателей инфицированности возбудителями клещевых трансмиссивных инфекций иксодовых клещей, удаленных после присасывания к человеку, на территории Хабаровского края в 2017–2024 гг.

Материалы и методы. С целью мониторинга инфицированности переносчиков клещевых трансмиссивных инфекций в течение эпидемического сезона (апрель – октябрь) 2017–2024 гг. было исследовано 16 863 напивавшихся иксодовых клещей, удаленных после присасывания к человеку, на территории Хабаровского края. Выявление антигена вируса клещевого энцефалита в клещах проводили методом иммуноферментного анализа, ДНК боррелий, риккетсий, эрлихий и анаплазм – методом полимеразной цепной реакции. Амплификацию нуклеиновых кислот проводили методом ОТ-ПЦР в режиме реального времени.

Результаты. Среди переносчиков, удаленных после присасывания к человеку, 76,0 % составили клещи рода *Ixodes*, клещи рода *Haemaphysalis* – 7,6 %, клещи рода *Dermacentor* – 3,1 %, клещи без уточнения рода – 13,3 %. Генетический материал возбудителей иксодовых клещевых боррелиозов – боррелий комплекса *B. burgdorferi* s. l. – был выявлен в 39,2 % проб, ДНК *B. miyamotoi* – в 6,6 % случаев, ДНК *A. phagocytophilum* – в 6,2 %, ДНК *E. muris* / *E. chaffeensis* – в 5,72 %, ДНК *R. sibirica* – в 0,4 %, ДНК *R. heilongjiangensis* – в 21,5 % проб. Наиболее подвержены многокомпонентному микст-инфицированию возбудителями КТИ (четырьмя и более) клещи рода *Ixodes*.

Заключение. Данные ежегодного мониторинга инфицированности иксодовых клещей доказывают наличие и активность сочетанных природных очагов клещевых трансмиссивных инфекций на территории Хабаровского края.

Ключевые слова: клещевые трансмиссивные инфекции, инфицированность, полимеразная цепная реакция, иксодовые клещи, Хабаровский край.

Для цитирования: Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е., Аушева Т.А. Выявление возбудителей клещевых трансмиссивных инфекций в иксодовых клещах, удаленных после присасывания к человеку, на территории Хабаровского края в эпидемические сезоны 2017–2024 гг. // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 10. С. 84–91. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-10-84-91

Detection of Tick-Borne Pathogens in Ixodid Ticks Removed from Humans in the Khabarovsk Krai during the Epidemic Seasons of 2017–2024

Nadezhda V. Belkina, Anna G. Dragomeretskaya, Olga E. Trotsenko, Tatyana A. Ausheva

Khabarovsk Research Institute of Epidemiology and Microbiology,
2 Shevchenko Street, Khabarovsk, 680610, Russian Federation

Summary

Introduction: The Khabarovsk Krai is home to multiple natural foci of tick-borne diseases noted for persistence and cyclicity. Of its 19 administrative territories, 16 are endemic for tick-borne encephalitis and other tick-borne diseases. In view of the above, monitoring of abundance, species composition, and infection rates in ixodid ticks is an essential element of epidemiological surveillance of this group of infections.

Objective: To analyze infection rates in embedded ixodid ticks removed from humans in the Khabarovsk Krai in 2017–2024.

Materials and Methods: In order to establish infection rates in ticks during the epidemic season (April–October) of the years 2017 to 2024, we tested 16,863 engorged ixodid ticks removed from humans in the Khabarovsk Krai. The enzyme-linked immunosorbent assay was used to detect the tick-borne encephalitis virus antigen while the real-time polymerase chain reaction detected the DNA of Borrelia, Rickettsia, Ehrlichia, and Anaplasma. Real-time RT-PCR was used as a nucleic acid amplification test.

Results: Of the ticks tested, 76.0 % were of the genus *Ixodes*, 7.6 % were of the genus *Haemaphysalis*, 3.1 % were of the genus *Dermacentor*, and 13.3 % were ticks of unspecified genus. Genetic material of tick-borne pathogens including *B. burgdorferi* s.l. complex was detected in 39.2 %, *B. miyamotoi* DNA – in 6.6 %, *A. phagocytophilum* DNA – in 6.2 %, *E. muris* / *E. chaffeensis* DNA – in 5.72 %, *R. sibirica* DNA – in 0.4 %, and *R. heilongjiangensis* DNA – in 21.5 % of the samples. Multiple (four or more) tick-borne pathogens were a more frequent finding in ixodid ticks.

Conclusion: Results of the annual monitoring of infection rates in ixodid ticks prove the presence and activity of combined natural foci of tick-borne diseases in the Khabarovsk Krai.

Keywords: tick-borne diseases, infection rate, polymerase chain reaction, ixodid ticks, Khabarovsk Krai.

Cite as: Belkina NV, Dragomeretskaya AG, Trotsenko OE, Ausheva TA. Detection of tick-borne pathogens in ixodid ticks removed from humans in the Khabarovsk Krai during the epidemic seasons of 2017–2024. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(10):84–91. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-10-84-91

Введение. Устойчивая тенденция к повышению уровня заболеваемости населения Российской Федерации клещевыми трансмиссивными инфекциями (КТИ) и расширению их нозоареалов, регистрация микст-инфекций, появление ранее неизвестных патогенов и новых нозологических форм болезней обуславливают актуальность мониторинга инфицированности переносчиков КТИ на эндемичных территориях [1–3]. Важно отметить, что ввиду социально-экономических последствий урбанизации риску нападения иксодовых клещей подвергаются и городские жители [4, 5]. На территории Хабаровского края локализируются сочетанные природные очаги КТИ, характеризующиеся стойкостью и цикличностью функционирования. Из 19 административных территорий края 16 являются эндемичными по вирусному клещевому энцефалиту (ВКЭ) и другим КТИ [6–8]. Известно, что изменение климата может приводить к увеличению численности переносчиков КТИ и их прокормителей на северных границах ареалов, антропогенное воздействие и социально-экономические условия на отдельных территориях, а также недостаточная информированность населения о мерах профилактики КТИ являются основными факторами, обуславливающими расширение природных очагов и увеличение показателей заболеваемости населения [9–12]. В связи с вышеизложенным неотъемлемым элементом эпидемиологического надзора за данной группой инфекций является мониторинг показателей обилия, видового состава и инфицированности иксодовых клещей возбудителями КТИ.

Цель исследования – анализ показателей инфицированности возбудителями клещевых трансмиссивных инфекций иксодовых клещей, удаленных после присасывания к человеку на территории Хабаровского края в 2017–2024 гг.

Материалы и методы. С целью мониторинга инфицированности переносчиков КТИ в течение эпидемического сезона (апрель – октябрь) 2017–2024 гг. было исследовано индивидуально 16 863 напивавшихся иксодовых клещей, удаленных после присасывания к человеку на территории Хабаровского края (12 816 экз. клещей рода *Ixodes*, 528 экз. рода *Dermacentor*, 1278 экз. рода *Haemaphysalis* и 2271 экз. без уточнения рода). С целью выявления антигена вируса клещевого энцефалита было исследовано 16 863 экз., генетического материала боррелий комплекса *Borrelia burgdorferi sensu lato* было исследовано 7776 экз., *Borrelia miyamotoi* – 2187 экз., *Anaplasma phagocytophilum*, *Ehrlichia muris*, *E. chaffeensis* – 2306 экз., *Rickettsia sibirica*, *Rickettsia heilongjiangensis* – 1869 экз. иксодовых клещей.

Перед исследованием клещей подвергали гомогенизации в гомогенизаторе TissueLyser LT и готовили суспензию. Клещей диспергировали в 250 мкл раствора для приготовления образцов (РПО). Выявление антигена вируса КЭ в клещах проводили методом иммуноферментного анализа (ИФА) набором «ВектоВКЭ-антиген». Постановка ПЦР включала в себя экстракцию ДНК из 100 мкл суспензий клещей (комплект реагентов для экстрак-

ции РНК/ДНК «РеалБест экстракция 100») с последующей детекцией ДНК-маркера с использованием ПЦР-тестов «РеалБест ДНК *Borrelia burgdorferi sensu lato*», «РеалБест ДНК *Borrelia miyamotoi*», «РеалБест ДНК *Anaplasma phagocytophilum* / *Ehrlichia muris*, *E. chaffeensis*», «РеалБест ДНК *Rickettsia sibirica* / *Rickettsia heilongjiangensis*». Амплификацию нуклеиновых кислот проводили методом ОТ-ПЦР в режиме Real Time на термоциклере «CFX 96».

Статистическую обработку полученных результатов (метод расчета стандартной ошибки выборки SE для оценки доли качественного признака в генеральной совокупности и метод доверительных интервалов для генеральной доли (относительной величины p) осуществляли с помощью программы Microsoft Excel (2013).

Результаты. Среди переносчиков, удаленных после присасывания к человеку на территории Хабаровского края в 2017–2024 гг., 76,0 % (95 % ДИ: 75,4–76,6 %) составили клещи рода *Ixodes*, клещи рода *Haemaphysalis* – 7,6 % (95 % ДИ: 7,2–7,9 %), клещи рода *Dermacentor* – 3,1 % (95 % ДИ: 2,9–3,4 %), клещи без уточнения рода – 13,3 % (95 % ДИ: 12,9–13,9 %) (рисунок). Максимум численности клещей родов *Ixodes* и *Haemaphysalis* приходился на май–июнь, для клещей рода *Dermacentor* пики показателей пришлись на май и сентябрь–октябрь. Стоит отметить, что для клещей рода *Ixodes* было характерно значительное увеличение числа нападений от 901 случая в апреле до 4987 случаев в мае – июне с последующим снижением до 1440 в июле и 251 в августе. Ввиду того что значительное число лиц, пострадавших от присасывания клещей, могут удалить их самостоятельно без обращения в медицинскую организацию (МО), реальное число лиц, пострадавших от их нападений, очевидно, больше регистрируемого.

В результате исследования напивавшихся клещей на наличие антигена ВКЭ в 2017–2024 гг. установлено, что среднееголетний показатель выявляемости составил 1,6 % (95 % ДИ: 1,4–1,7 %) (266 из 16 893 проб) с колебаниями от 0,93 % (95 % ДИ: 0,6–1,3 %) в 2019 г. до 2,3 % (95 % ДИ: 1,6–2,9 %) в 2023 г.

Генетический материал возбудителей ИКБ – боррелий комплекса *B. burgdorferi s. l.* – был выявлен в 3047 из 7776 проб (39,2 %; 95 % ДИ: 38,1–40,3 %). С апреля по июль был отмечен статистически значимый рост показателей выявляемости ДНК *B. burgdorferi s. l.* – от 35,4 % (95 % ДИ: 31,9–38,8 %) и до 44,1 % (95 % ДИ: 40,9–47,2 %) ($t = 3,68, p < 0,05$), затем следовало снижение показателя к концу эпидемического сезона (табл. 1). Необходимо отметить, что, согласно данным С.А. Рудаковой и соавт. (2025), в 2024 г. на территории Российской Федерации инфицированность боррелиями клещей *I. persulcatus*, собранных в природных станциях, составила 46,2 % [13]. На территории Хабаровского края инфицированность иксодовых клещей, собранных с растительности в 2022–2023 гг., составила 38,0 % (95 % ДИ: 33,38–42,69 %) [14].

В 2017–2024 гг. ДНК *B. miyamotoi* была обнаружена в 144 из 2187 проб (6,6 %; 95 % ДИ: 5,5–7,6 %).

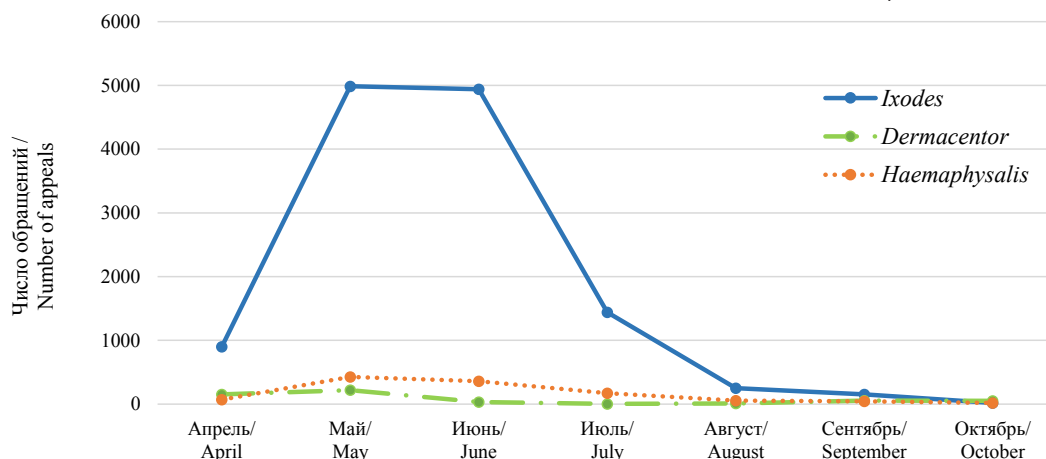


Рисунок. Помесячная динамика обращаемости населения с целью исследования иксодовых клещей, удаленных после присасывания в эпидемические сезоны 2017–2024 гг.

Figure. Monthly dynamics of the number of attached ixodid ticks removed from humans and tested during the epidemic seasons of 2017–2024

Самый высокий уровень заражения (9,2 %; 95 % ДИ: 7,0–11,3 %) наблюдался в мае. Далее последовало статистически значимое снижение этих показателей до 1,8 % в июле (95 % ДИ: 0,2–3,3 %) ($t = 5,54$, $p < 0,05$) и ростом до 4,9 % (95 % ДИ 0,7–9,1 %) в августе, с последующим снижением до 0 случаев в октябре (табл. 1).

ДНК *A. phagocytophilum* в 2017–2024 гг. была обнаружена в 142 из 2306 проб (6,2 %; 95 % ДИ: 5,2–7,1 %). Пик выявляемости пришелся на июнь и составил 8,7 % (95 % ДИ: 6,8–10,6 %), в июле генетический материал возбудителя был выявлен в 7,5 % (95 % ДИ: 4,6–10,3 %) случаев. За этим последовало постепенное снижение уровня выявления до 2 случаев в сентябре (2,5 %; 95 % ДИ: 0–5,8 %) и 1 случая в октябре (3,4 %; 95 % ДИ: 0–10,0 %).

Генетический материал возбудителей МЭЧ был обнаружен в 5,7 % (95 % ДИ: 4,8–6,7 %) (132 из 2306) проб. Несмотря на максимальный показатель в июне (8,1 %; 95 % ДИ 6,3–9,9 %), статистически значимых различий в выявлении ДНК *E. muris* / *E. chaffeensis* в течение эпидемического сезона не наблюдалось (табл. 1).

За исследуемый период ДНК *R. sibirica* была выявлена в 7 из 1869 проб (0,4 %; 95 % ДИ: 0,1–

0,7 %), ДНК *R. heilongjiangensis* – в 21,5 % (95 % ДИ: 19,6–23,4 %) (402 из 1869 проб). Пик показателей в 40,0 % (95 % ДИ: 33,6–45,8 %) был зафиксирован в июле. За этим следовало снижение до 18,2 % (95 % ДИ: 2,06–34,3 %) к концу эпидемического сезона.

В результате исследований, проведенных в эпидемический сезон 2017–2024 гг., у 504 из 16 863 (3,0 %; 95 % ДИ: 2,7–3,2 %) исследованных иксодовых клещей было выявлено микст-инфицирование возбудителями КТИ (табл. 2).

Как продемонстрировано в табл. 2, микст-инфицирование возбудителями КТИ было обнаружено у клещей рода *Ixodes* в 3,4 % (95 % ДИ: 3,08–3,7 %), у клещей рода *Dermacentor* – в 3,03 % (95 % ДИ: 1,6–4,5 %), у клещей рода *Haemaphysalis* – в 2,4 % (95 % ДИ: 1,6–3,3 %) случаев от числа исследованных клещей каждого рода. При этом многокомпонентное инфицирование (четырьмя и более возбудителями) отмечено только для клещей рода *Ixodes*. Следует отметить, что за исследуемый период наблюдения не было обнаружено микст-инфицирования клещей вирусом КЭ и *A. phagocytophilum*. Микст-инфицирование *B. miyamotoi* + *A. phagocytophilum* было отмечено только в 2024 г. и лишь у клещей рода *Haemaphysalis*.

Таблица 1. Помесячная динамика удельного веса (в %) ДНК возбудителей КТИ, выявленных в иксодовых клещах в эпидемические сезоны 2017–2024 гг. (суммарно)

Table 1. Monthly dynamics of the proportion of tick-borne pathogen DNAs detected in ixodid ticks during epidemic seasons of 2017–2024 (total, in %)

Название возбудителей / Name of pathogens	Период / Period						
	Апрель / April	Май / May	Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / October
ДНК <i>B. burgdorferi</i> s. l. / DNA <i>B. burgdorferi</i> s. l.	35,4	40,1	41,5	44,1	26,2	10,1	2,6
ДНК <i>B. miyamotoi</i> / DNA <i>B. miyamotoi</i>	6,6	9,2	6,9	1,8	4,9	0	0
ДНК <i>A. phagocytophilum</i> / DNA <i>A. phagocytophilum</i>	4,4	3,8	8,4	7,5	3,6	2,5	3,4
ДНК <i>E. muris</i> / <i>E. chaffeensis</i> / DNA <i>E. muris</i> / <i>E. chaffeensis</i>	4,4	4,6	8,1	4,5	1,2	4,9	0
ДНК <i>R. sib</i> / <i>heilongjiangensis</i> / DNA <i>R. sib</i> / <i>heilongjiangensis</i>	4,9	18	25,6	39,5	18,6	21,1	18,2

Таблица 2. Микст-инфицирование иксодовых клещей разных родов в 2017–2024 гг.
Table 2. Combinations of pathogens detected in ixodid ticks of different genera in 2017–2024

№ пп	Маркеры возбудителей / Pathogen markers	Род клещей / Genera of ticks		
		<i>Ixodes</i>	<i>Dermacentor</i>	<i>Haemaphysalis</i>
1	ВКЭ + <i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
2	ВКЭ + <i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i>	+	–	–
3	ВКЭ + <i>B.b.s.l.</i>	+	–	+
4	ВКЭ + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	–
5	ВКЭ + <i>B.b.s.l.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
6	ВКЭ + <i>R.h.</i>	+	–	–
7	<i>B.b.s.l.</i> + <i>R.h.</i>	+	+	+
8	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i>	+	–	–
9	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
10	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>A.ph.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
11	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>E.m./E.ch.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
12	<i>B.b.s.l.</i> + <i>A.ph.</i>	+	+	–
13	<i>B.b.s.l.</i> + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	–
14	<i>B.b.s.l.</i> + <i>E.m./E.ch.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
15	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	–
16	<i>B.b.s.l.</i> + <i>A.ph.</i> + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	–
17	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>A.ph.</i>	+	–	+
18	<i>B.b.s.l.</i> + <i>A.ph.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
19	<i>B.m.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	+
20	<i>B.m.</i> + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	–
21	<i>B.m.</i> + <i>A.ph.</i>	–	–	+
22	<i>A.ph.</i> + <i>E.m./E.ch.</i>	+	–	+
23	<i>E.m./E.ch.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–
24	<i>A.ph.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	+
25	<i>B.b.s.l.</i> + <i>B.m.</i> + <i>A.ph.</i> + <i>E.m./E.ch.</i> + <i>R.h.</i>	+	–	–

Примечания: + – возбудитель обнаружен, – – возбудитель не обнаружен; *R.h.* – *Rickettsia heilongjiangensis*; *B.b.s.l.* – *Borrelia burgdorferi* s.l.; *B.m.* – *Borrelia miyamotoi*; *A.ph.* – *Anaplasma phagocytophilum*; *E.m./E.ch.* – *Ehrlichia muris/E.chaffeensis*.

Notes: + pathogen detected, – – pathogen not detected; *R.h.* – *Rickettsia heilongjiangensis*; *B.b.s.l.* – *Borrelia burgdorferi* s.l.; *B.m.* – *Borrelia miyamotoi*; *A.ph.* – *Anaplasma phagocytophilum*; *E.m./E.ch.* – *Ehrlichia muris/E.chaffeensis*.

Обсуждение. В природных биоценозах и селитебных зонах на территории Хабаровского края выявлено распространение шести видов иксодовых клещей семейства *Ixodidae*, принадлежащих к трем родам: *Ixodes* (*I. persulcatus*, *I. pavlovskyi*), *Haemaphysalis* (*H. japonica douglasi*, *H. concinna*) и *Dermacentor* (*D. silvarum*, *D. reticulatus*). Клещ *I. persulcatus* Schulze, 1930 отличается доминированием по численности и повышенной агрессивностью к человеку, что определяет его высокую эпидемиологическую значимость в передаче возбудителей КТИ населению.

Первые имаго *I. persulcatus* появляются в южных районах края в конце марта – начале апреля. Период активности клещей длится от 140 до 194 дней в зависимости от погодных условий текущего года. Вид встречается на всей территории края, за исключением Аяно-Майского района и Охотского муниципального округа. Численность *I. pavlovskyi* Romerantzhev, 1946, на основании данных ежегодного мониторинга, сравнительно невысока, поэтому эпидемиологическое значение вида в Хабаровском крае в настоящее время уточняется [15].

Клещи рода *Dermacentor* (*D. silvarum* Olenov, 1931 и *D. reticulatus* Fabricius, 1794) широко распространены в Приамурье, обитают в луговых стациях, обычны в кустарниках и на опушках леса. Для вида характерны два пика численности – в апреле и сентябре. Первые имаго клеща *H. concinna* Koch, 1844 появляются в конце апреля, период активности вида 127–197 дней. В Приамурье широко распространенный вид, обитающий в широколиственных лесах, зонах с кустарниковой растительностью, луговых стациях. Клещи этих видов менее агрессивны по отношению к человеку.

H. japonica douglasi Warburton, 1908 – типичный дальневосточный вид; занимает ограниченную территорию в Приамурье и встречается преимущественно в южных районах края. Число нападений на человека этого вида клещей ежегодно небольшое. Ареал входит в границы хвойно-широколиственной лесной зоны. Обычен в кустарниках и на вырубках¹.

Известно, что дальневосточный генотип ВКЭ обладает высокой нейро- и иммунотропностью. Поэтому отличительными чертами клещевого энцефалита в Хабаровском крае при относительно

¹ Медико-экологический атлас Хабаровского края и Еврейской автономной области / Под ред. В.И. Волкова. Хабаровск, 2005. 110 с.

небольшом числе зарегистрированных случаев всегда были особая тяжесть течения, высокая летальность, инвалидизация пациентов и склонность к хронизации заболевания [16, 17]. Данные многолетнего мониторинга показывают, что инфицированность ВКЭ иксодовых клещей, удаленных после присасывания к человеку, не превышает 2,3 % (95 % ДИ: 1,6–2,9 %). Низкие показатели регистрируемой заболеваемости, вероятно, обусловлены эффективной системой профилактики, включающей вакцинацию населения и экстренную серопрфилактику клещевого вирусного энцефалита.

Показатели зараженности иксодовых клещей возбудителями ИКБ и КР в природных очагах 39,2 % (95 % ДИ: 38,1–40,3 %) и 21,5 % (95 % ДИ: 19,6–23,4 %), соответственно, обуславливают высокую частоту в случае заболеваний среди населения Хабаровского края. Наибольшие показатели числа нападений на человека и инфицированности возбудителями КТИ были отмечены у вида *I. persulcatus* (76,0 %; 95 % ДИ: 75,4–76,6 %), что определяет его высокую эпидемиологическую значимость.

Инфицированность клещей возбудителями гранулоцитарного анаплазмоза человека (ГАЧ) и моноцитарного эрлихиоза человека (МЭЧ) не превышает 6,2 % (95 % ДИ: 5,2–7,1 %). С момента начала официальной регистрации (в 2013 г.) заболеваний в РФ в Хабаровском крае были зарегистрированы единичные случаи ГАЧ и МЭЧ. В то же время данные сероэпидемиологического мониторинга свидетельствуют о контакте населения края с возбудителями. Специфические иммуноглобулины к *A. phagocytophilum* были выявлены у 5,1 % (95 % ДИ: 2,9–7,2 %) и к *E. muris/E. chaffeensis* у 8,1 % (95 % ДИ: 5,4–10,8 %) случаев [18].

В результате исследования иксодовых клещей на наличие маркеров возбудителей КР в подавляющем большинстве случаев было выявлено инфицирование клещей возбудителем *R. heilongjiangensis* (21,5 %; 95 % ДИ: 19,6–23,4 %). Необходимо отметить, что в Хабаровском крае отдельная регистрация клещевых риккетсиозов, вызываемых *R. sibirica* и *R. heilongjiangensis*, не проводится и все случаи КР регистрируются как сибирский клещевой тиф (СКТ). Чаще всего диагноз устанавливается по клинико-эпидемиологическим показателям. При этом ввиду низкой выявляемости *R. sibirica* (0,4 %; 95 % ДИ: 0,1–0,7 %) в иксодовых клещах, исследованных в 2017–2024 гг., представляется логичным предположить, что в подавляющем большинстве случаев заболевание было вызвано именно *R. heilongjiangensis* [19].

В Хабаровском крае регистрируются случаи одновременного инфицирования клещей несколькими патогенами (3,0 %; 95 % ДИ: 2,7–3,2 %), что может приводить к микст-инфекции у людей, пострадавших от их присасывания. Доказано, что наличие возбудителей вирусной и бактериальной этиологии в клеще не вызывает взаимного негативного влияния возбудителей [4]. Поэтому микст-инфекции у заболевших могут иметь крайне тяжелое течение [5, 7].

Важно отметить, что в Приамурье показатели инфицированности иксодовых клещей возбудителя-

ми КТИ имеют территориальную неравномерность. Так, в Хабаровском крае данные показатели (за исключением ВКЭ) значительно превышают таковые на сопредельной территории Амурской области. Среднепогодный уровень инфицированности клещей возбудителями ИКБ на территории области в период 2014–2023 гг. составил 6,26 % (95 % ДИ: 5,7–6,7 %); КР – 0,25 % (95 % ДИ: 0,1–0,3 %), ГАЧ – 0,15 % (95 % ДИ: 0,07–0,2 %), МЭЧ – 0,05 % (95 % ДИ: 0,01–0,09 %) [20–27]. Однако среднепогодный показатель инфицированности клещей ВКЭ на территории Амурской области составил 2,3 % (95 % ДИ: 2,04–2,6 %), что оказалось статистически значимо выше уровня, установленного в Хабаровском крае ($t = 4,19; p < 0,05$).

Заключение. Данные ежегодного мониторинга инфицированности иксодовых клещей доказывают наличие и активность сочетанных природных очагов клещевых трансмиссивных инфекций на территории Хабаровского края. Для клещей вида *I. persulcatus* были отмечены высокие показатели числа нападений на человека и инфицированности возбудителями КТИ, что подтверждает его высокую эпидемиологическую значимость. Одновременное инфицирование клещей несколькими патогенами обуславливает возможность возникновения микст-инфекций у людей, пострадавших от присасывания клеща.

Результаты исследования подтверждают необходимость соблюдения мер неспецифической профилактики КТИ в период активности иксодовых клещей при посещении территорий лесного фонда, парковых зон, зон сохранения естественных ландшафтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погорелова Л.В., Голубева М.В., Погосова М.А., Мусаелян О.А. Природно-очаговые инфекции в практике педиатра. Ставрополь: Ставропольский государственный медицинский университет, 2022. 188 с.
2. Романова А.П., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е., Алейникова Н.В., Каравянская Т.Н. Ситуация по клещевым трансмиссивным инфекциям в Хабаровском крае в 2010–2019 гг. // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2020. № 39. С. 111–116.
3. Штрек С.В., Рудаков Н.В., Шпынов С.Н. и др. Эпидемиологическая ситуация по риккетсиозам и лихорадке Ку в Российской Федерации за период 2010–2023 гг., прогноз на 2024 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2024. № 3. С. 63–73. doi: 10.21055/0370-1069-2024-3-63-73
4. Берлизова М.В., Лубова В.А., Курловская А.В., Леонова Г.Н. Иксодовые клещи как переносчики возбудителей природно-очаговых заболеваний в эпидемический сезон 2017 г. на территории Приморского края // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2018. № 73. С. 4–12.
5. Ковальский А.Г., Полещук Д.Н., Светашева А.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О. Е., Пивоварова И.Г. Состояние популяций переносчиков и резервуарных хозяев возбудителей клещевых трансмиссивных инфекций на территории г. Хабаровска и пригородной зоны в 2020 году // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2021. № 40. С. 99–102.
6. Берсенев Ю.И. Национальный парк «Зов тигра» (краткий обзор) // Заповедные территории. 2020.

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-10-84-91>
Original Research Article

- № 1. С. 125-137. doi: 10.25808/26186764.2020.69.47.006
7. Андаев Е.И., Никитин А.Я., Толмачёва М.И. и др. Эпидемиологическая ситуация по клещевому вирусному энцефалиту в Российской Федерации за 2015–2024 гг. и краткосрочный прогноз заболеваемости на 2025 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2025. № 1. С. 6-17. doi: 10.21055/0370-1069-225-1-6-17
 8. Рудаков Н.В., Пеньевская Н.А., Кумпан Л.В. и др. Эпидемиологическая ситуация по риккетсиозам группы клещевой пятнистой лихорадки в Российской Федерации в 2012–2021 гг. и прогноз на 2022–2026 гг. Проблемы особо опасных инфекций. 2022. № 1. С. 54–63. doi: 10.21055/0370-1069-2022-1-54-63
 9. Василенко Н.Ф., Прислегина Д.А., Таран Т.В. и др. Особенности проявлений эпидемического процесса клещевых трансмиссивных инфекций на юге России в современный период. Эпидемиол. инфекц. болезни. Актуал. вопр. 2020. Т. 10. № 1. С. 14–20. doi: 10.18565/epidem.2020.10.1.14-20
 10. Прислегина Д.А., Малецкая О.В., Дубянский В.М., Таран Т.В., Платонов А.Е. Клещевые трансмиссивные инфекции на юге России: современная эпидемиологическая ситуация, новый подход к построению прогнозных и объясняющих моделей заболеваемости (на примере астраханской риккетсиозной и крымской геморрагической лихорадок) // Инфекция и иммунитет. 2023. Т. 13. № 3. С. 535-548. doi: 10.15789/2220-7619-TBI-2036
 11. Steinbrink A, Brugger K, Margos G, Kraiczky P, Klimpel S. The evolving story of *Borrelia burgdorferi sensu lato* transmission in Europe. *Parasitol Res.* 2022;121(3):781-803. doi: 10.1007/s00436-022-07445-3
 12. Eisen L. Vector competence studies with hard ticks and *Borrelia burgdorferi sensu lato* spirochetes: A review. *Ticks Tick Borne Dis.* 2020;11(3):101359. doi: 10.1016/j.ttbdis.2019.101359
 13. Рудакова С.А., Теслова О.Е., Муталинова Н.Е. и др. Эпидемиологическая ситуация по иксодовым клещевым боррелиозам в Российской Федерации в 2010–2024 гг. и прогноз на 2025 г. // Проблемы особо опасных инфекций. 2025;(2):39-46. doi: 10.21055/0370-1069-2025-2-39-46
 14. Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е., Аушева Т.А. Видовое разнообразие возбудителей иксодовых клещевых боррелиозов в клещах *Ixodes persulcatus* на территории Хабаровского края // Проблемы особо опасных инфекций. 2024;(2):70-75. doi: 10.21055/0370-1069-2024-2-70-75
 15. Драгомерецкая А.Г., Полещук Д.Н., Ковальский А.Г., Троценко О.Е., Белкина Н.В., Светашева А.В. Состояние популяций и инфицированность переносчиков возбудителей клещевых трансмиссивных инфекций в городской среде и пригородной зоне на примере г. Хабаровска // Дезинфекционное дело. 2022. № 2. С. 61-69. doi: 10.35411/2076-457X-2022-2-61-69
 16. Захарычева Т.А., Семенов В.А., Бондаренко Т.Е. и др. Современный клещевой энцефалит и другие клещевые инфекционные заболевания в Хабаровском крае и в Кемеровской области (Кузбассе) // Дальневосточный медицинский журнал. 2022. № 3. С. 6-12. doi: 10.35177/1994-5191-2022-3-1
 17. Лубова В.А., Шутикова А.Л., Леонова Г.Н. Трансмиссивные клещевые инфекции на юге Дальнего Востока // Санитарный врач. 2021. № 9. С. 33-41. doi: 10.33920/med-08-2109-03
 18. Драгомерецкая А.Г., Мжелская Т.В., Троценко О.Е., Романова А.П., Иванов Л.И., Высочина Н.П. Распространение на территории Хабаровского края возбудителей гранулоцитарного анаплазмоза человека и моноцитарного эрлихиоза человека // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2018. № 34. С. 38-42.
 19. Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е., Ковальский А.Г., Голобокова Е.В. Современная эпидемиологическая ситуация по клещевым риккетсиозам на территории Хабаровского края // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2021. № 40. С. 103-108.
 20. Бурдинская Е.Н., Натыкан Ю.А., Курганова О.П., Пшеничная Н.Ю., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е. Основные проявления клещевых трансмиссивных инфекций на территории Амурской области в 2014–2023 гг. // Здоровье населения и среда обитания. 2024. Т. 32. № 4. С. 65–74. doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-4-65-74
 21. Мельникова О.В., Вершинин Е.А., Вержуцкая Ю.А. и др. Многолетний мониторинг системы клещ – возбудитель в природных очагах клещевого энцефалита пригородов Иркутска // Паразитология. 2021. Т. 55. № 3. С. 204-225. doi: 10.31857/S0031184721030029
 22. Kullberg BJ, Vrijmoeth HD, van de Schoor F, Hovius JW. Lyme borreliosis: Diagnosis and management. *BMJ.* 2020;369:m1041. doi: 10.1136/bmj.m1041
 23. Сироткин М.Б. Влияние экосистемных факторов на природные очаги иксодовых клещевых боррелиозов в связи с совершенствованием их эпидемиологического мониторинга // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2024. № 3. С. 35-45. doi: 10.33092/0025-8326mp2024.3.35-44
 24. Чичерина Г.С., Панов В.В., Бутакова Д.А. и др. Влияние климатических факторов на численность иксодовых клещей (Acari: ixodidae) в периоды высокого и низкого обилия (юго-восток западной Сибири) // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2024. № 4. С. 21-27. doi: 10.33092/0025-8326mp2024.4.21-27
 25. Бондаренко А.Л., Любезнова О.Н., Кропанев А.В., Кузнецова К.Н. Современная характеристика клещевого энцефалита // Журнал инфектологии. 2020. Т. 12. № 2. С. 36-37.
 26. Guérin M, Shawky M, Zedan A, et al. Lyme borreliosis diagnosis: State of the art of improvements and innovations. *BMC Microbiol.* 2023;23(1):204. doi: 10.1186/s12866-023-02935-5
 27. Захарычева Т.А., Мжелская Т.В., Троценко О.Е. и др. Клещевой энцефалит – история изучения в Хабаровском крае (к 85-летию открытия заболевания) // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2022. № 42. С. 31-38.

REFERENCES

1. Pogorelova LV, Golubeva MV, Pogosova MA, Musaelyan OA. [Natural Focal Infections in the Practice of a Pediatrician.] Stavropol: Stavropol State Medical University; 2022. (In Russ.)
2. Romanova AP, Dragomeretskaya AG, Trosenko OE, Aleinikova NV, Karavyanskaya TN. Epidemiological situation on tick-borne infections in the Khabarovsk Region in 2010-2019 years. *Dal'nevostochnyy Zhurnal Infektsionnoy Patologii.* 2020;(39):111-116. (In Russ.)
3. Shtrek SV, Rudakov NV, Shpynov SN, et al. Epidemiological situation on rickettsial diseases and Q fever in the Russian Federation over the period of 2010–2023, forecast for 2024. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsiy.* 2024;(3):63-73. (In Russ.) doi: 10.21055/0370-1069-2024-3-63-73
4. Berlizova MV, Lubova VA, Kurlovskaya AV, Leonova GN. Iksodetic tongs as the carriage of the forgers of natural-focal diseases to the epidemic season 2017 in the territory of the Primorsk Region. *Zdorov'e. Meditsinskaya Ekologiya. Nauka.* 2018;(1(73)):4-12. (In Russ.) doi: 10.5281/zenodo.1194868

5. Kovalsky AG, Poleshuk DN, Svetasheva AV, Dragomeretskaya AG, Trotsenko OE, Pivovarova IG. Status of transmitter populations and reservoir hosts of tick-borne transmissible infections in the Khabarovsk city and suburban zone territory in year 2020. *Dal'nevostochnyy Zhurnal Infektsionnoy Patologii*. 2021;(40):99-102. (In Russ.) doi: 10.25808/26186764.2020.69.47.006
6. Bersenev Yul. Zov Tigra National Park (short review). *Biota i Sreda Zapovednykh Territoriy*. 2020;(1):125-137. (In Russ.) doi: 10.25808/26186764.2020.69.47.006
7. Andaev EI, Nikitin AY, Tolmacheva MI, et al. Epidemiological situation on tick-borne viral encephalitis in the Russian Federation over the period of 2015–2024 and short-term incidence forecast for 2025. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsiy*. 2025;(1):6-17. (In Russ.) doi: 10.21055/0370-1069-2025-1-6-17
8. Rudakov NV, Pen'evskaya NA, Kumpan LV, et al. Epidemiological situation on tick-borne spotted fever group rickettsioses in the Russian Federation in 2012–2021, prognosis for 2022–2026. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsiy*. 2022;(1):54–63. (In Russ.) doi: 10.21055/0370-1069-2022-1-54-63
9. Vasilenko NF, Prislegina DA, Taran TV, et al. Features of manifestations of the epidemic process of tick-borne transmissible infections in the south of Russia in our times. *Epidemiologiya i Infektsionnye Bolezni. Aktual'nye Voprosy*. 2020;10(1):14-20. (In Russ.) doi: 10.18565/epidem.2020.10.1.14-20
10. Prislegina DA, Maletskaya OV, Dubyanskiy VM, Taran TV, Platonov AE. Tick-borne infections in the south of Russia: Modern epidemiological situation, new approach to create “forecasting” and “explaining” morbidity models (in Astrakhan rickettsiosis fever and Crimean-Congo hemorrhagic fever). *Infektsiya i Immunitet*. 2023;13(3):535-548. (In Russ.) doi: 10.15789/2220-7619-TBI-2036
11. Steinbrink A, Brugger K, Margos G, Kraiczky P, Klimpel S. The evolving story of *Borrelia burgdorferi* sensu lato transmission in Europe. *Parasitol. Res*. 2022;121(3):781-803. doi: 10.1007/s00436-022-0745-3
12. Eisen L. Vector competence studies with hard ticks and *Borrelia burgdorferi* sensu lato spirochetes: A review. *Ticks Tick Borne Dis*. 2020;11(3):101-359. doi: 10.1016/j.ttbdis.2019.10.1359
13. Rudakova SA, Teslova OE, Mutalinova NE, et al. Review of the epidemiological situation on ixodidae tick-borne borrelioses in the Russian Federation in 2010–2024 and forecast for 2025. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsiy*. 2025;(2):39-46. (In Russ.) doi: 10.21055/0370-1069-2025-2-39-46
14. Belkina NV, Dragomeretskaya AG, Trotsenko OE, Ausheva TA. Species Diversity of Ixodidae Tick-Borne Borrelioses Agents in Ixodes persulcatus Ticks in the Territory of the Khabarovsk Region. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii*. 2024;(2):70-75. (In Russ.) doi: 10.21055/0370-1069-2024-2-70-75
15. Dragomeretskaya AG, Poleshuk DN, Kovalsky AG, Trotsenko OE, Belkina NV, Svetasheva AV. Condition of population and infection rate of tick-borne infections carriers in the settings of urban environment and rural zone in the case of Khabarovsk city. *Dezinfektsionnoe Delo (Disinfection Affairs)*. 2022;(2):61-69. (In Russ.) doi: 10.35411/2076-457X-2022-2-61-69
16. Zakharycheva TA, Semenov VA, Bondarenko TE, et al. Modern tic-borne encephalitis and other tic-borne infections in Khabarovsk Region and Kemerovsk region (Kuzbass). *Dal'nevostochnyy Meditsinskiy Zhurnal*. 2022;(3):6-12. (In Russ.) doi: 10.35177/1994-5191-2022-3-1
17. Lubova VA, Shutikova AL, Leonova GN. Transmissible tick-borne infections in the south of the Far East. *Sanitarnyy Vrach*. 2021;(9):33-41. (In Russ.) doi: 10.33920/med-08-2109-03
18. Dragomeretskaya AG, Mzhelskaya TV, Trotsenko OE, Romanova AP, Ivanov LI, Vysochina NP. Distribution in the territory of Khabarovsk Territory of the formators of granulocyte anaplasmosis of human and monocytary herrychiosis of human. *Dal'nevostochnyy Zhurnal Infektsionnoy Patologii*. 2018;(34):38-42. (In Russ.)
19. Belkina NV, Dragomeretskaya AG, Trotsenko OE, Kovalsky AG, Golobokova EV. Current epidemiological situation on tick-borne rickettsiosis in the Khabarovsk Krai. *Dal'nevostochnyy Zhurnal Infektsionnoy Patologii*. 2021;(40):103-108. (In Russ.)
20. Burdinskaya EN, Natykan YuA, Kurganova OP, Pshenichnaya NYu, Dragomeretskaya AG, Trotsenko OE. General manifestations of tick-borne infections in the Amur Region in 2014–2023. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2024;32(4):65-74. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-4-65-74
21. Melnikova OV, Vershinin EA, Verzhutskaya YuA, et al. Long-term monitoring of the tick-pathogen system in natural foci of tick-borne encephalitis in the suburbs of Irkutsk. *Parazitologiya*. 2021;55(3):204-225. doi: 10.31857/S0031184721030029.
22. Kullberg BJ, Vrijmoeth HD, van de Schoor F, Hovius JW. Lyme borreliosis: Diagnosis and management. *BMJ*. 2020;369:m1041. doi: 10.1136/bmj.m1041
23. Sirotkin MB. The influence of ecosystem factors on natural foci of ixodid tick-borne borreliosis in connection with the improvement of their epidemiological monitoring. *Meditsinskaya Parazitologiya i Parazitarnye Bolezni*. 2024;(3):35-45. (In Russ.) doi 10.33092/0025-8326mp2024.3.35-44
24. Chicherina GS, Panov VV, Butakova DA, Zinkina AS, Chicherina SD, Glupov VV. Influence of climatic factors on the number of Ixodid ticks (Acari: Ixodidae) during periods of high and low abundance (south-east of Western Siberia). *Meditsinskaya Parazitologiya i Parazitarnye Bolezni*. 2024;(4):21-27. (In Russ.) doi: 10.33092/0025-8326mp2024.4.21-27
25. Bondarenko AL, Lyubeznova ON, Kropanev AV, Kuznetsova KN. [Modern characteristics of tick-borne encephalitis.] *Journal of Infectologii*. 2020;12(2S1):36-37. (In Russ.)
26. Guérin M, Shawky M, Zedan A, et al. Lyme borreliosis diagnosis: State of the art of improvements and innovations. *BMC Microbiol*. 2023;23(1):204. doi: 10.1186/s12866-023-02935-5
27. Zakharycheva TA, Mzhelskaya TV, Trotsenko OE, et al. Tick-borne encephalitis - history of study in the Khabarovsk Region (in connection with 85th anniversary of discovery of the disease). *Dal'nevostochnyy Zhurnal Infektsionnoy Patologii*. 2022;(42):31-38. (In Russ.)

Сведения об авторах:

✉ Белкина Надежда Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории клещевого энцефалита и других природно-очаговых инфекций отдела ПОИ; e-mail: hniiem-poi.labke@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1336-4260>.

Драгомерецкая Анна Геннадьевна – к.б.н., заведующий отделом природно-очаговых инфекций; e-mail: poi_hniiem@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-1849>.

Троценко Ольга Евгеньевна – д.м.н., директор, e-mail: trotsenko_oe@hniiem.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3050-4472>.

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-10-84-91>
Original Research Article

Аушева Татьяна Антоновна – младший научный сотрудник лаборатории клещевого энцефалита и других природно-очаговых инфекций отдела ПОИ; e-mail: hniiem-poi.labke@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1448-6560>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: *Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е.*; анализ и интерпретация результатов: *Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Аушева Т.А.*; обзор литературы: *Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г.*, подготовка рукописи: *Белкина Н.В., Драгомерецкая А.Г., Троценко О.Е., Аушева Т.А.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения комитета по био-медицинской этике или иных документов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 24.07.25 / Принята к публикации: 06.10.25 / Опубликовано: 31.10.25

Author information:

✉ Nadezhda V. **Belkina**, Junior Researcher, Laboratory of Tick-Borne Encephalitis and Other Natural Focal Infections, Department of Natural Focal Infections; e-mail: hniiem-poi.labke@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1336-4260>.

Anna G. **Dragomeretskaya**, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Department of Natural Focal Infections; e-mail: poi_hniiem@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-1849>.

Olga E. **Trotsenko**, Dr. Sci. (Med.); Director, e-mail: trotsenko_oe@hniiem.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3050-4472>.

Tatyana A. **Ausheva**, Junior Researcher, Laboratory of Tick-Borne Encephalitis and Other Natural Focal Infections, Department of Natural Focal Infections; e-mail: hniiem-poi.labke@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1448-6560>.

Author contributions: study conception and design: *Belkina N.V., Dragomeretskaya A.G., Trotsenko O.E.*; analysis and interpretation of results: *Belkina N.V., Dragomeretskaya A.G., Ausheva T.A.*; bibliography compilation and referencing: *Belkina N.V., Dragomeretskaya A.G.*, draft manuscript preparation: *Belkina N.V., Dragomeretskaya A.G., Trotsenko O.E., Ausheva T.A.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: July 24, 2025 / Accepted: October 6, 2025 / Published: October 31, 2025