

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 574.591.9

ОЦЕНКА КЛИМАТОГЕННОЙ УГРОЗЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТАЕЖНОГО КЛЕЩА *Ixodes persulcatus* НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАН В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

© 2021 г. И. О. Попов^{a, *}, С. М. Семенов^{a, b, c}, Е. Н. Попова^b

^aИнститут глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

^cНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*e-mail: igor_o_popov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 10.11.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Дана модельная оценка и построены картосхемы пространственного распределения климатогенной угрозы распространения таежного клеща *Ixodes persulcatus* на территории России и ряда соседних стран в 1971–1980 и 2001–2010 гг. Оценка угрозы произведена с применением ранее разработанного оригинального метода, основанного на принципах статистического моделирования. Показаны закономерности пространственного распределения степени климатогенной угрозы развития популяций таежного клеща в пределах его климатического ареала. Продемонстрировано, что максимальная степень угрозы характеризует центральные части климатического ареала, а ближе к его границам угроза уменьшается. Рассчитаны изменения климатогенной угрозы распространения таежного клеща во втором периоде по отношению к первому и построены картосхемы пространственного распределения степени этих изменений. Установлено обусловленное изменением климата значительное повышение угрозы развития популяций таежного клеща во второй период по сравнению с первым на большей части ареала, в особенности — на севере. При этом в юго-западной части ареала и в некоторых других происходит снижение климатогенной угрозы распространения.

Ключевые слова: иксодовые клещи, *Ixodes persulcatus*, изменение климата, статистическое моделирование, последствия изменения климата, климатогенные угрозы, моделирование ареалов, изменения ареалов видов

DOI: 10.31857/S2587556621020138

ВВЕДЕНИЕ

Таежный клещ *Ixodes persulcatus* (Schulze, 1930) представляет собой кровососущего эктопаразита человека и позвоночных животных и является переносчиком возбудителей таких опасных заболеваний, как клещевой энцефалит, клещевые боррелиозы (болезнь Лайма), сальмонеллез, бабезиоз и др. (Таежный..., 1985; Labuda, Nuttal, 2008). Его ареал занимает огромную площадь Евразии и располагается на территориях России, Финляндии, Белоруссии, стран Балтии, Китая, Монголии, КНДР и Японии. Имеются его популяции в Карпатах и на Тянь-Шане (Филиппова, 1971; Таежный..., 1985; Estrada-Peña et al., 2013). Однако большая часть ареала находится в России.

Известно, что климат во многих случаях имеет решающее значение в определении границ распространения видов (Bonan, 2011; Gray et al., 2009; Shimel, 2013). Ранее авторами были идентифицированы климатические условия, опреде-

ляющие территорию распространения таежного клеща (Попов, 2016; Попов, Попова, 2020). Также было показано, что основным экологическим критерием — лимитирующим фактором, определяющим его ареал, является климат. Знание условий развития вида позволяет моделировать его климатический ареал в разных климатических ситуациях, соответствующих разным периодам прошлого или будущего, используя данные о фактических или модельных климатах.

В последние десятилетия, начиная с середины 1970-х годов, наблюдается изменение глобального климата, индуцирующее возникновение или же усиление ряда климатогенных угроз. Среди них — изменение территорий распространения важных или опасных для человека или его жизнедеятельности видов (Попов, 2016; Попова, Попов, 2019; McCarty, 2001; Shimel, 2013).

В связи с присоединением России в 2019 г. к Парижскому соглашению выявление климато-

генных угроз и адаптация к ним стали особенно актуальными, в том числе в работе национальных гидрометеослужб (Парижское..., 2015). Медицинская и ветеринарная значимость таежного клеща определяет важность оценки угроз расширения его ареала в условиях климатических изменений на территории России и соседних стран.

Установленные авторами климатические условия распространения таежного клеща позволили создавать детерминистические модели ареала, в которых для каждой единицы исследуемой территории дается бинарная оценка возможности распространения на ней вида — “входит в ареал” или “не входит в ареал” (Попов, 2016; Попов, Попова, 2020; Попова, Попов, 2019). Впоследствии авторами была разработана и апробирована методика, позволяющая оценивать и вероятность возникновения таких климатогенных угроз (Семенов и др., 2019, 2020), что является необходимым звеном в оценке рисков.

Цель настоящей работы — статистическая оценка климатогенных угроз изменения климатического ареала *I. persulcatus* на территории России и соседних стран в 2001–2010 гг. по сравнению с 1971–1980 гг. (начало интенсивного изменения глобального климата) на основе ранее идентифицированных климатических критериев устойчивого существования популяций в заданном локусе с применением указанной выше методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее авторами были идентифицированы климатические условия распространения таежного клеща (Попов, 2016; Попов, Попова, 2020). Географический локус относится к его климатическому ареалу, если среднеянварская температура приземного воздуха в нем меньше -5°C , среднегодовая температура воздуха меньше 5.3°C , сумма активных температур воздуха при пороге 10°C больше $1340^{\circ}\text{C} \times \text{сут}$, годовая сумма осадков больше 339 мм.

Методика оценивания вероятности климатогенной угрозы распространения вида на исследуемой территории на основе бинарных моделей распространения (входит/не входит в климатический ареал) была изложена в работах (Семенов и др., 2019, 2020). Поэтому здесь приводится лишь ее краткое описание.

Основная идея методики заключается в оценке вероятности отнесения географического локуса к климатическому ареалу вида, исходя из свойств климата определенного периода времени. В качестве подобного периода возьмем десятилетие. Погодные условия в пределах заданного десятилетия могут год от года меняться (флуктуировать), и данный локус в разные годы может

быть то пригодным для обитания вида (обозначим вероятность этого события через p), то непригодным. Обозначим через p_0 пороговое значение для вероятности p , превышение которого означает отнесение локуса к ареалу, т.е. установившийся климат, соответствующий рассматриваемому десятилетию, допускает устойчивое существование рассматриваемого вида. В данной работе принято $p_0 = 0.5$.

В качестве вероятности возникновения климатогенной угрозы (т.е. распространения вида в данном локусе) в этой работе используется уровень достоверности P , на котором гипотезу $p < p_0$ можно отвергнуть, исходя из фактического числа k благоприятных для вида лет, реализовавшихся в рассматриваемое десятилетие. При этом считается, что при заданном p вероятностное распределение k описывается биномиальным законом.

Согласно терминологии, принятой в Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Mastrandrea et al., 2010), вербальная характеристика вероятностей основывается на вероятности ошибки $\epsilon = 1 - P$: промежуток $(0.66, 1]$ соответствует категории “маловероятно”, $(0.33, 0.66]$ соответствует категории “столь же вероятно сколь нет” (для краткости — средневероятно), $(0.10, 0.33]$ — “вероятно”, $(0.01, 0.10]$ — “весьма вероятно”, $(0, 0.01]$ — “практически достоверно”.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения k (из 10 лет), соответствующие этим категориям, для реализации климатогенной угрозы распространения клеща *I. persulcatus* в исследуемом локусе. Для значений k , приведенных во втором столбце таблицы (если их приведено несколько, то для всех указанных), вероятность возникновения климатической угрозы вербально характеризуется в соответствующей ячейке первого столбца таблицы.

В настоящей работе были исследованы угрозы распространения таежного клеща на территории России и ряда соседних стран в два периода времени: 1971–1980 гг., соответствующий началу интенсивного изменения глобального климата, и 2001–2010 гг., соответствующий началу XXI в.

В качестве источника данных по климату использовали базу метеоданных Climate Research Unit (CRU) Университета Восточной Англии (Harris et al., 2014), представляющую собой массив среднемесячных значений температуры и месячных сумм осадков, подготовленный авторитетным в этой области коллективом ученых. Фактически это данные метеорологических станций, приведенные к месячному масштабу времени (что позволяет избежать пропусков данных) и регулярной пространственной сетке $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Этот массив используется в оценочных докладах Межпра-

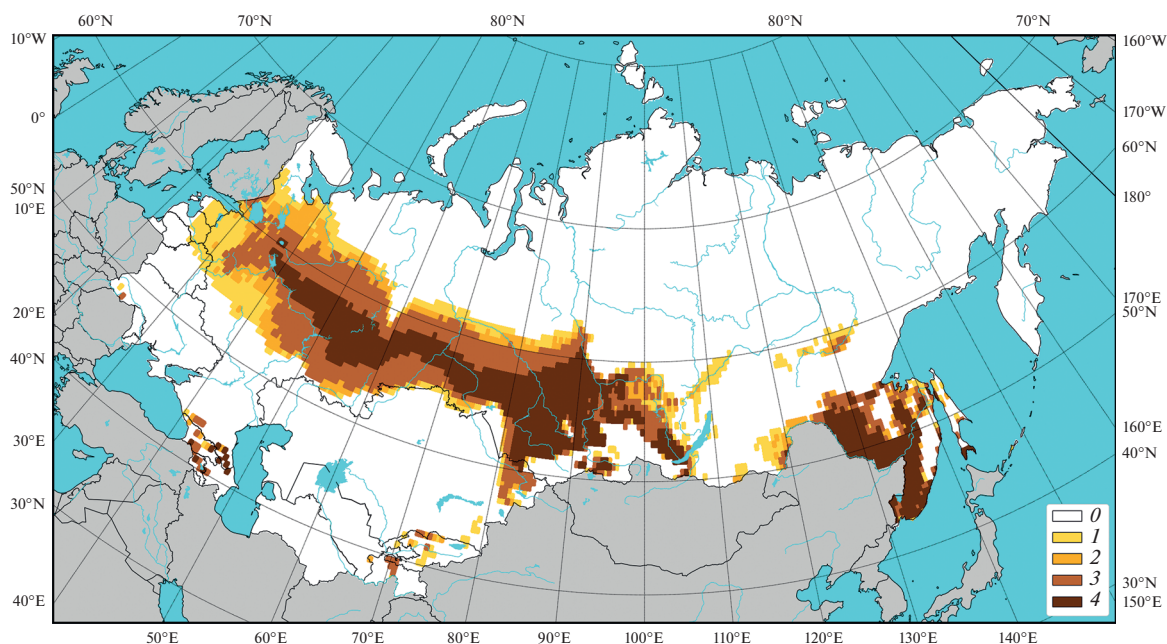


Рис. 1. Расчетная вероятность распространения таежного клеща *I. persulcatus* на территории России и соседних стран в 1971–1980 гг.

Примечание: 0 — маловероятно, 1 — средневероятно, 2 — вероятно, 3 — весьма вероятно, 4 — практически достоверно.

вительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Расчет суммы активных температур за год требует рядов данных среднесуточной температуры. Конечно, для этого было бы эффективно использовать аналогичный массив данных не ежемесячно, а суточного разрешения. Однако подобных массивов, приведенных к регулярной пространственной сетке, в свободном доступе в климатических базах не имеется. Поэтому для их получения ступенчатая функция, принимающая в пределах каждого календарного месяца значение, равное среднемесячному, приближалась суммой начальных членов ее разложения в ряд Фурье (до гармоник с периодом в четверть года включительно).

Для изучения качества такой аппроксимации был использован массив климатических данных суточного разрешения, созданный и поддерживаемый Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации — Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД, <http://meteo.ru>). Из этого массива были выбраны данные о среднесуточной температуре с 546 метеорологических станций, расположенных на территории бывшего СССР. Эти станции расположены в широтном поясе 50°–65° с.ш.; долгота не превышала 100° в.д. Использовались лишь годы без пропусков данных. Для каждого такого года были рассчитаны среднемесячные значения

среднесуточной температуры. Затем по ним строили среднесуточные данные с помощью ряда Фурье. Далее для такого модельного ряда и для исходного ряда среднесуточных значений температуры, т.е. для результатов метеорологических наблюдений, рассчитывали сумму активных температур с порогом 10°C. Для большинства станций ошибка не превышала 20%.

Расчеты проводили с помощью программ, написанных на языке программирования Python 3. Процедуры интерполяции среднемесячных данных на среднесуточные и расчета ранга вероятности климатогенной угрозы были написаны на языке Фортран 77 и с помощью библиотеки `boost::python` для языка C++ преобразованы в бинарные модули для Python 3, что дало возможность запускать их из программ, написанных на этом языке.

На основании полученных результатов расчета вероятности климатогенной угрозы распространения *I. persulcatus* были созданы картосхемы, представленные на рис. 1 и 2. Для их создания использовали пакет электронного картографирования Basemap для языка программирования Python 3. Каждая пространственная ячейка закрашивалась цветом, соответствующим рангу вероятности климатогенной угрозы (см. табл. 1).

Для оценки изменения вероятности климатогенной угрозы распространения *I. persulcatus* в период 2001–2010 гг. по сравнению с периодом

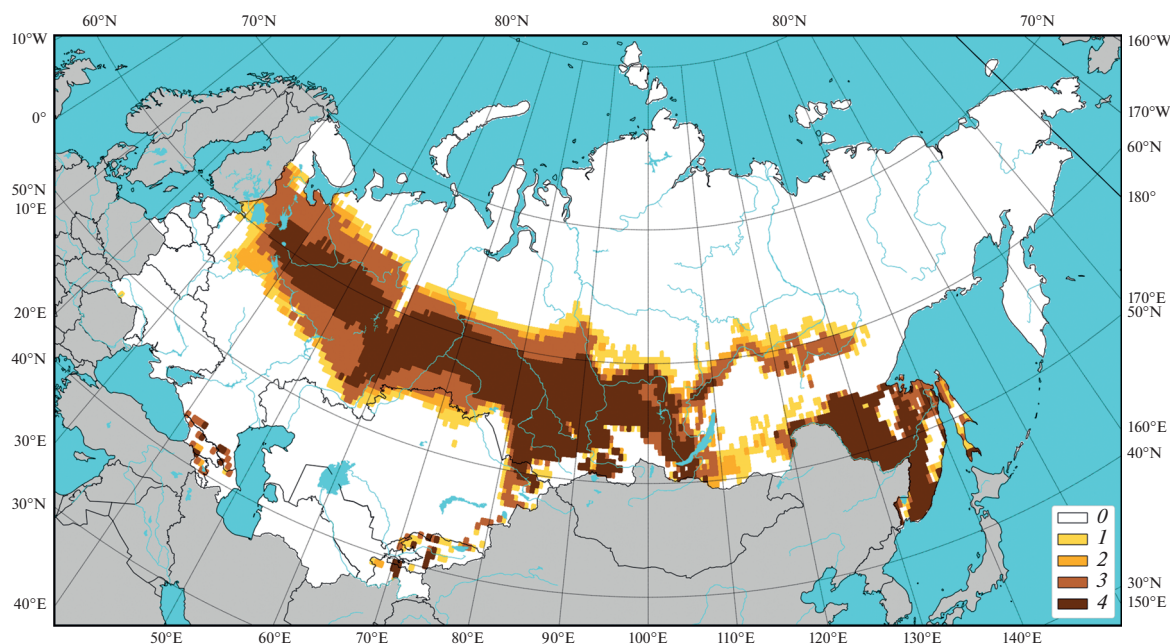


Рис. 2. Расчетная вероятность распространения таежного клеща *I. persulcatus* на территории России и соседних стран в 2001–2010 гг.

Примечание: 0 – маловероятно, 1 – средневероятно, 2 – вероятно, 3 – весьма вероятно, 4 – практически достоверно.

1971–1980 гг. применяли изменение ранга Δ – разность между рангом во второй период R_2 и рангом в первый период времени R_1 : $\Delta = R_2 - R_1$. Δ может принимать значения от -4 до 4 . Пространственное распределение Δ представлено на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Картосхемы вероятностей распространения таежного клеща (см. рис. 1 и 2) показывают, что

Таблица 1. Характеризация вероятности возникновения климатогенной угрозы распространения *I. persulcatus* в географическом локусе, исходя из числа k благоприятных для вида лет за десятилетие

Вербальная характеристика вероятности климатогенной угрозы	Значение k	Ранг
Маловероятно	0–4	0
Средневероятно	5, 6	1
Вероятно	7	2
Весьма вероятно	8, 9	3
Практически достоверно	10	4

зоны наибольших климатогенных угроз располагаются в центре климатического ареала, а ближе к краям они уменьшаются. Эта закономерность соответствует общим представлениям об экологической структуре ареала, когда в его середине условия существования популяций ближе к оптимальным, нежели по краям, где снижается плотность и численность популяции, хуже условия для развития особей, в некоторых случаях скорость роста популяций имеет нулевое или отрицательное значение, а численность самих популяций поддерживается за счет миграции из внутренних областей ареала (Gaston, 2003).

Зоны низкой вероятности климатогенной угрозы (градации “средневероятно” и “вероятно”) в 2001–2010 гг. по сравнению с периодом 1971–1980 гг. становятся очень узкими, за исключением области в южной части Забайкалья (см. рис. 2).

Климатические изменения, происшедшие в последние десятилетия XX в. и в начале XXI в., отразились в изменении вероятности распространения таежного клеща по территории России и соседних стран. Это показывает как сравнительный анализ рис. 1 и 2, так и картосхема изменений рисков на рис. 3. Произошло сильное снижение вероятности климатогенной угрозы в юго-западной части климатического ареала. Распростране-

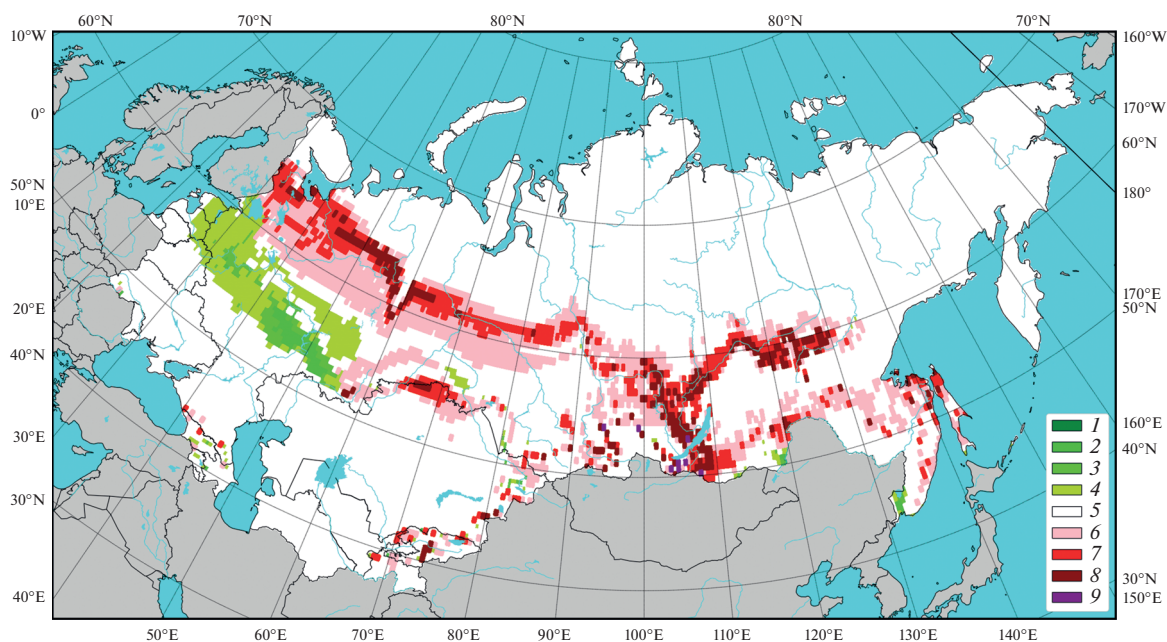


Рис. 3. Изменение (Δ) расчетной вероятности распространения таежного клеща *I. persulcatus* на территории России и соседних стран в 2001–2010 гг. по сравнению с 1971–1980 гг.

Примечание: 1 – очень сильное уменьшение ($\Delta = -4$), 2 – сильное уменьшение ($\Delta = -3$), 3 – среднее уменьшение ($\Delta = -2$), 4 – слабое уменьшение ($\Delta = -1$), 5 – изменение не выявлено ($\Delta = 0$), 6 – слабое увеличение ($\Delta = 1$), 7 – среднее увеличение ($\Delta = 2$), 8 – сильное увеличение ($\Delta = 3$), 9 – очень сильное увеличение ($\Delta = 4$).

ние клеща на севере Белоруссии, в странах Балтии, а также в западных и в некоторых центральных регионах России, где в период 1971–1980 гг. наблюдается область достаточно низкой вероятности климатогенной угрозы, стало маловероятным. Также она снизилась в Карпатах и в Закарпатье.

При этом резко увеличились риски в северной части ареала. Наблюдается повышение степени риска в более северных регионах, как в европейской части России, так и в Сибири. Схожая картина наблюдается в Забайкалье и в горных регионах Алтая: чем ближе к горной части, тем сильнее повышается риск. Также отмечается повышение риска на северном Кавказе и на Тянь-Шане, как и на большей части Дальнего Востока (см. рис. 3).

В центре ареала вероятность климатогенной угрозы не изменяется и остается по-прежнему высокой. И если в европейской части России и в Западной Сибири такая зона достаточно узка и тянется полосой с запада на восток, то в Южной Сибири эта зона весьма обширна (см. рис. 3).

Можно сделать вывод, что наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата сильно повлияли на вероятность распространения *I. persulcatus* на территории России и соседних стран. Полученные результаты согласуются с выводами, ранее сделанными при детерминистическом мо-

делировании изменений климатического ареала таежного клеща, а также с имеющимися данными о наблюдаемых в последние десятилетия изменениях ареала этого вида (Попов, 2016). Однако статистическое модельное оценивание климатогенных угроз дает много больше информации о пригодности территорий для существования на ней популяций исследуемого вида и для оценки характеристик этих популяций. Как и бинарное моделирование ареалов, эти исследования могут быть использованы государственными организациями в планировании адаптационных мер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе ранее созданной бинарной модели климатического ареала таежного клеща с применением оригинальной статистической методики, учитывающей временную изменчивость климатических предикторов распространения биологических видов, была выполнена оценка вероятностей климатогенных изменений угроз распространения таежного клеща *I. persulcatus* на территории России и ряда соседних стран в 1971–1980 и 2001–2010 гг. Также был проведен анализ изменений их значений во втором периоде по сравнению с первым. Показано, что на значительной территории эти вероятности во втором периоде по сравнению

с первым повышаются. Однако при этом отмечаются и обширные территории их снижения.

Полученные результаты могут быть использованы учреждениями здравоохранения в ходе мероприятий по предотвращению негативных последствий климатических изменений и в планировании адаптационных мер.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках темы НИР государственного Института географии РАН № 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2 “Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России”. Получение и обработка метеорологических данных проведены в рамках темы 3.1.: “Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций” плана НИТР Росгидромета.

FUNDING

The work was performed within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS no. 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2 “Climate Change and Its Consequences for the Environment and Population Life and Activities on the Territory of Russia.” The meteorological data were obtained and processed due to the funding of theme 3.1.: “Development of the Methods and Technologies of Climate Servicing, Including the Improvement of Models for Climate Prediction, Methods of Assessing the Consequences of Climate Changes, Climate Substantiation of National Adaptation Plans, and Monitoring of Adaptation Efficiency” according to the plan of Roshydromet.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015. 32 с. https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения 12.05.2020).
- Попов И.О. Климатически обусловленные изменения аутэкологических ареалов иксодовых клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* на территории России и стран ближнего зарубежья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 24 с.
- Попов И.О., Попова Е.Н. Идентификация климатических условий, ограничивающих распространение таежного клеща *Ixodes persulcatus* на территории России и соседних стран // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 94–97.
- Попова Е.Н., Попов И.О. Моделирование потенциальных климатических ареалов биологических видов и их климатогенных изменений // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 1. С. 58–75.
- Семенов С.М., Инсаров Г.Э., Мендес К.Л. Характеристика неопределенностей в оценках Межправительственной группы экспертов по изменению климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 1. С. 76–96.
- Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 59–65.
- Таежный клещ *Ixodes persulcatus* Schulze (Acarina, Ixodidae). Морфология, систематика, экология, медицинское значение. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1985. 416 с.
- Филиппова Н.А. О видах группы *Ixodes persulcatus* [Parasitiformes: Ixodidae]. VI. Особенности ареалов *I. pavlovskyi* Pom. и *Ixodes persulcatus* Schulze в связи с их палеогенезом // Паразитология. 1971. Т. V. Вып. 5. С. 385–391.
- Bonan G.B. Ecological Climatology. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2011. 550 p.
- Estrada-Peña A., Farkas R., Jaenson T.G.T., Koenen F., Madder M., Pascucci I., Salman M., de Sousa R., Walker A.R. Ticks and Tick-borne Diseases. Geographical Distribution and Control Strategies in the Euro-Asia Region. CAB International, 2013. 292 p.
- Gaston K.J. The Structure and Dynamics of Geographic Ranges. Oxford: Oxford Univ. Press, 2003. 266 p.
- Gray J.S., Dautel H., Estrada-Pena A., Kahl O., Lindgren E. Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe // Interdiscip. Perspect. on Infect. Dis. 2009. V. 2009. Article ID 593232. 12 p.
- Harris I., Jones P., Osborn T., Lister D. Updated high resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatology. 2014. V. 34. P. 623–642.
- Labuda M., Nuttall P.A. Viruses transmitted by ticks // Ticks: Biology, Disease and Control / Bowman A.S., Nuttall P.A. (Eds.) UK: Cambridge Univ. Press, 2008. P. 253–280.
- Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010. 4 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf (дата обращения 12.05.2020).
- McCarty J.P. Ecological Consequences of Recent Climate Change // Conserv. Biol. 2001. V. 15. № 2. P. 320–331.
- Schimmel D. Climate and ecosystems. Princeton and Oxford: Princeton Univ. Press, 2013. 240 p.

Assessment of Climatogenic Hazard of the Taiga Tick *Ixodes persulcatus* Distribution in and Neighboring Countries at the Beginning of the 21st Century

I. O. Popov^{1,*}, S. M. Semenov^{1,2,3}, and E. N. Popova²

¹*Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

²*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

*e-mail: igor_o_popov@mail.ru

A statistical assessment is given and schematic maps of the spatial distribution of the climatogenic hazard of the taiga tick *Ixodes persulcatus* distribution in Russia and several neighboring countries in 1971–1980 and 2001–2010 are constructed. The hazard assessment was made using a previously developed original method based on the principles of statistical modeling. The regularities of the spatial distribution of the degree of climatogenic hazard of the development of taiga tick populations within tick's geographic range are shown: the maximum degree of hazard characterizes the central parts of the range; the hazard decreases closer to the borders. The changes in the climatogenic hazard of the taiga tick distribution in the second period with respect to the first are calculated. A significant increase in the hazard of the taiga tick populations development in the second period compared to the first one in the greater part of the range, especially in its northern part, has been established due to climate change. At the same time, in the southwestern part of the geographic range and in some other parts of it, there was a decrease in the climatogenic hazard of distribution.

Keywords: ixodid ticks, *Ixodes persulcatus*, climate change, statistical modeling, effects of climate change, climatogenic hazards, species distribution modeling, changes in species geographic ranges

REFERENCES

- Bonan G.B. *Ecological Climatology*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 550 p.
- Estrada-Peña A., Farkas R., Jaenson T.G.T., Koenen F., Madder M., Pascucci I., Salman M., de Sousa R., Walker A.R. *Ticks and Tick-borne Diseases. Geographical Distribution and Control Strategies in the Euro-Asia Region*. Salman M., Tarrés-Call J., Eds. Boston: CAB Int., 2013. 292 p.
- Filippova N.A. On species of the *Ixodes persulcatus* group [Parasitiformes: Ixodidae]. VI. Features of ranges *I. pavlovskyi* Pom. and *Ixodes persulcatus* Schulze in connection with their paleogenesis. *Parazitologiya*, 1971, vol. 5, no. 5, pp. 385–391. (In Russ.).
- Gaston K.J. *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2003. 266 p.
- Gray J.S., Dautel H., Estrada-Pena A., Kahl O., Lindgren E. Effects of climate change on ticks and tick-borne diseases in Europe. *Interdiscip. Perspect. Infect. Dis.*, 2009, vol. 2009, Article ID 593232, 12 p. doi 10.1155/2009/593232
- Harris I., Jones P., Osborn T., Lister D. Updated high resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3. 10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 623–642.
- Labuda M., Nuttall P.A. Viruses transmitted by ticks. In *Ticks: Biology, Disease and Control*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008, pp. 253–280.
- Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiwers F.W. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2010. 4 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf (accessed: 12.05.2020).
- McCarthy J.P. Ecological consequences of recent climate change. *Conserv. Biol.*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 320–331.
- Paris Agreement. United Nations, 2015. Available at: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (accessed: 12.05.2020).
- Popov I.O. Climate-related changes in autecological ranges of ticks *Ixodes ricinus* and *Ixodes persulcatus* on the territory of Russia and near-abroad countries. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Acad., 2016. 24 p.
- Popov I.O., Popova E.N. Identification of climate conditions restricting the distribution of the taiga tick *Ixodes persulcatus* on the territory of Russia and in neighboring countries. *Dokl. Earth Sci.*, 2020, vol. 493, pp. 562–564.
- Popova E.N., Popov I.O. Modeling of potential climatic ranges of biological species and their climate-driven changes. *Fundam. Prikl. Klimatol.*, 2019, vol. 1, pp. 58–75. (In Russ.).
- Schimmel D. *Climate and Ecosystems*. Princeton Univ. Press, 2013. 240 p.
- Semenov S.M., Insarov G.E., Méndez C.L. Characterization of uncertainties in assessments of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Fundam. Prikl. Klimatol.*, 2019, vol. 1, pp. 76–96. (In Russ.). doi 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96
- Semenov S.M., Popov I.O., Yasyukevich V.V. Statistical model for assessing the formation of climate-related hazards based on climate monitoring data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 339–344.
- Taezhnyi kleshch *Ixodes persulcatus* Schulze (Acarina, Ixodidae). *Morfologiya, sistematika, ekologiya, meditsinskoe znachenie* [Taiga Tick *Ixodes persulcatus* Schulze (Acarina, Ixodidae). Morphology, Systematics, Ecology, Medical Significance]. Leningrad: Nauka Publ., 1985. 416 p.