

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ
АРЕАЛОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ВИДОВ
И ИХ КЛИМАТОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ**

*Е.Н. Попова^{1,2)}, И.О. Попов²⁾**

¹⁾ Институт географии РАН,
РФ, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29; *en_popova@mail.ru*

²⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б; **igor_o_popov@mail.ru*,

Реферат. Климатический ареал вида – это область географического пространства, каждая точка которой характеризуется климатическими условиями, допускающими устойчивое существование его популяций. Изменения климата приводят к изменениям климатического ареала. В статье представлено несколько методик моделирования климатических ареалов биологических видов. Эти методики позволяют оценить пригодность территории для заселения как аборигенными видами, так и чужеродными инвазионными видами, которые пока еще отсутствуют в данном регионе. Методики применены для расчетной оценки произошедших современных и ожидаемых в XXI веке изменений климатических ареалов колорадского жука и европейского лесного клеща.

Ключевые слова. Моделирование ареалов, климатический ареал, климатические предикторы, изменения климата.

Введение

Территории распространения видов формируются под влиянием различных экологических факторов, как биотических (конкуренция, хищничество, мутуализм и пр.), так и абиотических. Последние создают основу, фон, в рамках которого действуют биотические факторы распространения (Peterson et al., 2011). Среди основных абиотических факторов, формирующих ареал видов, наиважнейшими являются климатические факторы, определяющие температурный и влажностной режим территорий. Организмы могут существовать и размножаться только в определенном интервале температуры, а вода является одним из основных веществ, необходимым для их функционирования (Попова, Попов, 2013). Существенные изменения климата, которые происходят в последние десятилетия и, несомненно, будут происходить в будущем, закономерно оказывают влияние на различные биологические организмы. В результате ряд видов оказывается под риском исчезновения, другие

же, напротив, расширяют территории своего распространения. Среди последних немало видов, важных для человека: вредители сельскохозяйственных культур, переносчики и возбудители опасных заболеваний человека и животных и т. п. К положительным последствиям можно отнести расширение территорий возделывания некоторых культурных растений (Второй оценочный доклад..., 2014; Попова, Попов, 2013; Попов и др., 2013).

В связи с вышесказанным очевидна необходимость развития методов моделирования потенциальных ареалов видов, важных для человека и его деятельности, и их климатогенных изменений. Центральным моментом в этом процессе является установление зависимости условий, необходимых для устойчивого существования популяций вида, от климатических факторов, т.е. создание модели эколого-климатической ниши вида. Она может быть представлена как часть многомерного пространства климатических параметров, каждая точка которой соответствует возможности существования данного вида (Soberón, 2007). В связи с этим, нами рассмотрена концепция «климатического ареала вида» – такой части географического пространства, где климатические условия допускают возможность устойчивого существования популяции вида (Попова, Попов, 2013; Попов, 2016). В зависимости от условий окружающей среды и биологических особенностей конкретного вида климатический ареал является либо частью аутоэкологического ареала вида или же идентичен ему (Попов, 2016).

Методология построения климатических ареалов видов с помощью климатических предикторов в отечественной литературе была подробно обоснована в работе (Семенов и др. 2006). Впоследствии она неоднократно применялась в конкретных задачах моделирования ареалов и модифицировалась. Сейчас необходимо дать обновленное описание основных современных методов моделирования климатических ареалов видов, зависящих от различных климатических параметров, их изменений под влиянием изменения климата и продемонстрировать некоторые результаты подобного моделирования. В этом состоит цель данной работы.

Данные и методы

В этой статье мы рассмотрим два основных метода моделирования климатических ареалов видов: 1) с использованием значений климатических предикторов, установленных экспериментально или же в ходе натурных наблюдений и 2) с использованием значений климатических предикторов, подобранных в соответствии с выявленным и очерченным ареалом вида. При этом под термином «климатический предиктор» понимается климатический параметр и его значение, которое является критическим для данного вида и определяет границы области его устойчивого существования.

Основными климатическими предикторами для видов, как правило, являются следующие величины (прикладные климатические индексы):

- сумма активных температур¹⁾ (САТ), °С·сут;
- сумма эффективных температур (СЭТ), °С·сут;

- среднегодовая температура воздуха, °С;
- средняя температура января, °С;
- средняя температура июля, °С;
- годовое или сезонное количество осадков, мм;
- влажность воздуха или почвы, %;
- гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК);
- радиационный индекс сухости Будыко.

Более подробно эти и другие предикторы рассмотрены в статьях (Попова, Попов, 2013; Popova et al., 2017; 2018).

Для оценки климатических значений этих величин используются различные базы метеорологических данных. Обычно, исходной метеорологической информацией служат ряды среднесуточных значений температуры воздуха и количества осадков, полученных на сети гидрометеорологических станций международного обмена. Часть таких станций расположена на территории России и в странах бывшего СССР (рис. 1). Они передают телеграммы, содержащие информацию о суточных значениях температуры и осадков (код FM_12-VII_SYNOP), в Глобальную сеть телесвязи (ГСТ). Данные метеорологических наблюдений на этих станциях в наибольшей степени представлены с 1936 г. Сбор результатов наблюдений, их контроль, архивирование и хранение были организованы Всероссийским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета) в виде базы данных рядов по температуре и осадкам, измеренным на этих станциях, с месячным и суточным разрешением по времени. Эта информация в 1999 г. была депонирована в сети Интернет для свободного использования (<http://www.meteo.ru>). В этой работе участвуют также и другие научно-исследовательские институты Росгидромета, в частности, ИГКЭ и ГГО (<http://climatechange.ru>).

В последние годы все более развивается сеть спутниковых измерений, которая охватывает значительно большее пространство, чем сеть наземных метеостанций. Данные систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) интенсивно используются в рамках множества тематических проектов и программ (Асмус и др., 2005). Начиная с 2000 года, широко применяются данные спектрорадиометра MODIS, установленного на американских спутниках Terra и Aqua. Прибор MODIS имеет ширину полосы обзора 2330 км и просматривает всю поверхность Земли каждые один-два дня. Его детекторы измеряют 36 спектральных полос от 0.405 до 14.385 мкм. Спектрорадиометр MODIS получает данные с тремя пространственными разрешениями – 250 м, 500 м и 1000 м (MODIS data products).

В дальнейшем для выбранных климатических предикторов, определяющих климатический ареал вида, рассчитывают средние значения за исследуемый период времени $[t_1, t_2]$, где t_1 – начальный год периода, а t_2 – конечный

¹⁾ В данной работе значения температуры относятся к высоте стандартных метеорологических наблюдений на метеостанциях – около 2 м над земной поверхностью

год. Данные о климатических значениях затем интерполируются на центры квадратов географической сетки $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Алгоритм и методика подобных расчетов представлены в работах (Семенов, Гельвер, 2002, Семенов и др., 2006). Полученные расчетные данные о климатическом ареале вида визуализируют с помощью построения картосхем в какой-либо геоинформационной системе (ГИС). В данной работе использовали ГИС MapInfo Professional или пакет Basemap для языка программирования Python.

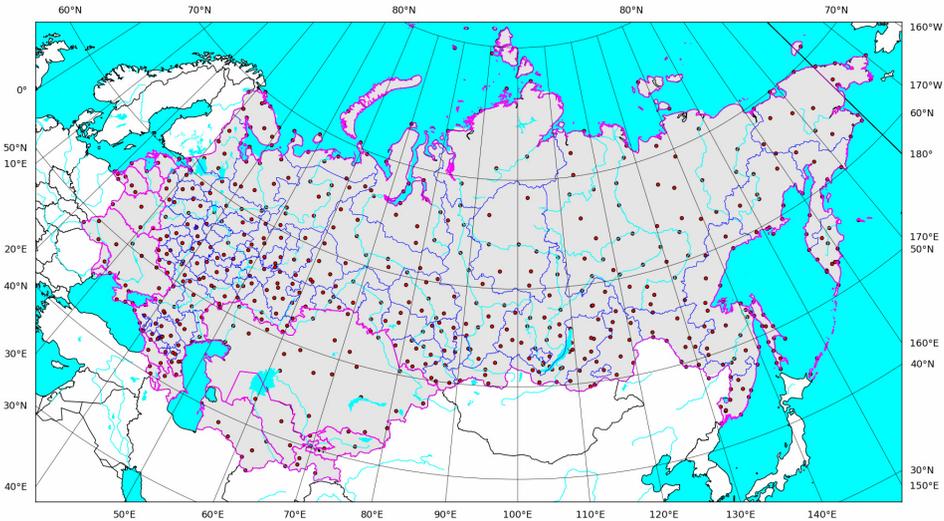


Рисунок 1. Расположение гидрометеорологических станций международного обмена на территории России и соседних стран (Попов, 2016)

Если выполнить расчеты для двух временных периодов, например, за два десятилетия или тридцатилетия, то можно сравнить полученные расчетные климатические ареалы и проанализировать те направления, в которые ареал расширялся или же сужался. Данные произведенных расчетов также нагляднее представить картографически в виде картосхемы для удобства визуальной и масштабной территориальной сравнительной оценки.

Результаты и обсуждение

Построение климатического ареала вида по ранее установленным предикторам

Как уже упоминалось в методическом разделе, один из методов исследования климатического ареала вида – его моделирование по климатическим предикторам, установленным экспериментально или же при натурных исследованиях данного вида. Этот метод наиболее уместен при изучении видов-вселенцев, чужеродных для данной территории, на которой их распространение еще не имеет законченного сформировавшегося географического ареала.

В качестве примера использования данного метода приведем рассчитанный и построенный нами ареал одного из наиболее опасных вредителей картофеля и других пасленовых культур – колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say), причиняющего значительный ущерб сельскому хозяйству. Из климатических предикторов, выявленных ранее зоологами, изучающими этот вид беспозвоночных, по нашим оценкам, в наибольшей степени реальному распространению колорадского жука соответствовали следующие:

– сумма эффективных температур воздуха, составляющая $360^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ при нижнем пороге 11.5°C , которая необходима для развития хотя бы одной генерации вредителя (Злотников, 1967);

– среднегодовая температура воздуха, находящаяся в пределах от 0 до 20°C (Trouvelot, 1936) – этот критерий ограничивает распространение колорадского жука в Северной Америке, где его ареал считается уже окончательно сформировавшимся.

По этим критериям, при использовании гидрометеорологических данных наземных наблюдений сети Росгидромета, был построен климатический ареал вида *Leptinotarsa decemlineata* Say (рис. 2) за тридцатилетний период: с 1981 г. (год массового появления колорадского жука на Европейской части России (ЕЧР), в частности, в Московской области) по 2010 гг.



Рисунок 2. Климатический ареал колорадского жука, рассчитанный по данным гидрометеорологических наблюдений за период 1981-2010 гг.

Условные обозначения: 1 – территория вне ареала,
2 – территория климатического ареала вида

По имеющимся в научной литературе данным зоологических наблюдений в начальный период – 1981 г. – колорадский жук был обнаружен лишь на ЕЧР (Колорадский жук..., 1981), тогда как остальную часть рассчитанного нами

потенциального климатического ареала он занял лишь в последующие годы. Так, колорадский жук расширил свой ареал в северном, северо-восточном и восточном направлениях, достигнув Иркутской области. Параллельно, с 2000 г. он начал заселять Приморский и Хабаровский края, Амурскую область, появился на юге о. Сахалин (Ророва, 2014; Попова, 2017). Все это подтверждает правильность сделанного нами прогноза о возможном распространении колорадского жука и о совпадении его современного фактического ареала с рассчитанным нами потенциальным климатическим ареалом.

***Построение климатического ареала вида по предикторам,
установленным на основе их подбора к очерченному
географическому ареалу данного вида***

Другой метод модельного описания климатического ареала вида, предпочтительный для аборигенных или давно натурализовавшихся видов, с практически сформировавшимся географическим ареалом – это метод оцифровки его фактического ареала и подбора математическими методами климатических предикторов, в наибольшей степени соответствующих этому ареалу.

В данной статье для примера в качестве модельного объекта был выбран один из переносчиков трансмиссивных болезней человека и животных – представитель иксодовых клещей – *Ixodes ricinus* Linnaeus, 1758 (европейский лесной клещ). Иксодовые клещи являются переносчиками возбудителей таких опасных заболеваний животных и человека, как клещевой энцефалит, иксодовый клещевой боррелиоз (болезнь Лайма), туляремия и др. Этот вид, как и все беспозвоночные, чувствителен к изменениям климата.

Согласно литературным данным (Коренберг, 2004, 2008; Коренберг, Ковалевский, 1981; Коротков, 2005; Коротков и др., 2008; Филиппова, 1977), климатическими факторами, лимитирующими распространение иксодовых клещей вида *I. ricinus*, являются:

- сумма активных среднесуточных температур воздуха в приповерхностном слое за календарный год (САТ) не меньше $1400^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ (при пороге 10°C);
- годовая сумма осадков не менее 400 мм;
- среднемесячная температура января не менее -14°C .

Для более точного определения предельных (критических) значений климатических параметров, определяющих ареал *I. ricinus*, была проведена оцифровка его фактического ареала. На основе карты ареала лесного европейского клеща, представленной в монографии (Таежный клещ..., 1985) и ряда других процитированных выше публикаций, было построено бинарное поле, соответствующее ареалу вида, для территории России и соседних стран (рис. 3). При этом используется пространственная сетка с ячейками $1^{\circ}\times 1^{\circ}$. Каждой ячейке присваивались численные значения 1 или 0, если она соответственно входит или не входит в ареал вида. В результате было определено, что цифровой ареал *I. ricinus* на территории России и соседних стран имеет размер 366 элементов сетки. Надо отметить, что этот ареал основывается на данных, собранных в 50-70-х годах XX века, и отображает распространение европейского лесного клеща именно в этот период. В связи с этим, для расчётов,

направленных на уточнение климатических предикторов, определяющих потенциальный климатический ареал европейского лесного клеща *I. ricinus*, использовались климатические данные за 1951-1980 гг.

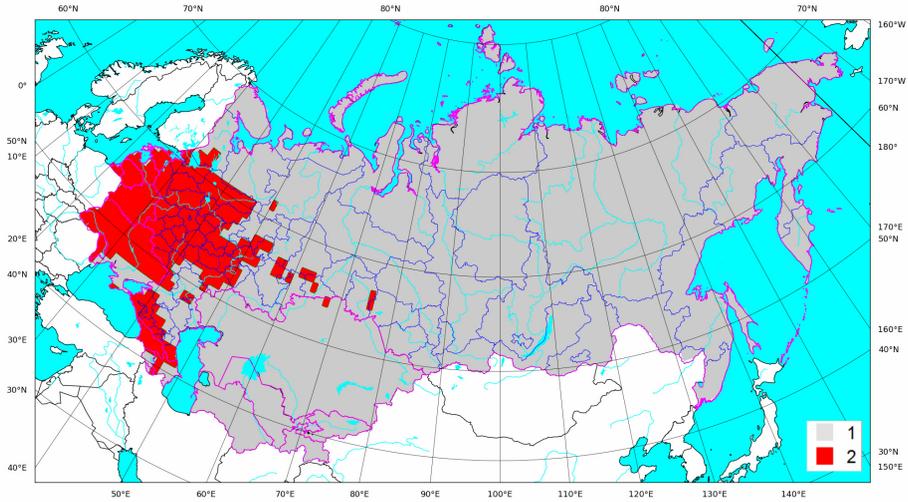


Рисунок 3. Цифровой ареал европейского лесного клеща *I. ricinus* (Попов, 2016)
Условные обозначения: см. рис. 2

Уточнение предельных (критических) значений климатических предикторов проводилось путем перебора всех возможных комбинаций значений климатических параметров, лимитирующих распространение вида, расчёта климатического ареала на основе заданной комбинации значений и оценки совпадения рассчитанного ареала с фактическим, оцифрованным для 1951-1980 гг. Границы интервалов, в которых варьировали подбираемые параметры, определялись согласно литературным данным и климатическим характеристикам фактических ареалов клещей за 1951-1980 гг., указанным в табл. 1. Подбиралась комбинация значений, соответствующая наилучшему совпадению ареалов.

Для реализации данной процедуры подбора была создана компьютерная программа, содержащая несколько вложенных циклов, в которых переменные, соответствующие климатическим факторам, перед началом каждого цикла инициировались значением меньшей границы анализируемого интервала и увеличивались после каждой итерации на значение, равное суточной разрешающей способности применяемой базы данных метеонаблюдений ВНИИГМИ-МЦД (табл. 1).

При каждой итерации процедуры подбора производился расчёт климатического ареала и осуществлялась оценка его совпадения с фактическим ареалом вида. Для оценки совпадения может применяться ряд статистических критериев, использование которых для данной цели описано в литературе (Peterson et al., 2011). В данной работе был применён статистический параметр каппа Коэна (Cohen kappa) (Boslaugh, 2013). Его использование для калибровки модели климатической ниши описано в ряде публикаций (Monserud, Leemans, 1992; Huntley et al., 1995; Porretta et al., 2013).

Таблица 1. Границы предельных (критических) значений климатических предикторов и значения итерационных шагов, использованные в процедуре уточнения климатических условий распространения клещей *I. ricinus* на территории России и соседних стран

Климатический параметр	<i>I. ricinus</i>		
	минимум	максимум	шаг
Средняя температура января, °С	-18	-10	0.1
Годовая сумма осадков, мм	300	600	1
САТ (при пороге 10°С), °С · сут	1300	2000	10
среднегодовая температура, °С	-	-	-

Значение каппы Коэна (принимает значения от -1 до 1) рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{P_o + P_e}{1 - P_e} .$$

Здесь P_o — наблюдаемое согласие данных, а P_e — ожидаемое согласие данных. Они рассчитываются по следующим формулам:

$$P_e = \frac{(a + c)(a + b) + (b + d)(c + d)}{(a + b + c + d)^2} ,$$

$$P_o = \frac{a + d}{a + b + c + d} .$$

Переменная a соответствует числу ячеек $1^\circ \times 1^\circ$, общих для обоих ареалов, b – числу ячеек, принадлежащих только расчетному ареалу, c – числу ячеек, принадлежащих только фактическому ареалу, d – числу ячеек на территории России и стран ближнего зарубежья, не принадлежащих ни одному ареалу.

Результаты уточнённых оценок предельных значений климатических факторов, определяющих распространение иксодовых клещей вида *I. ricinus*, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Уточнённые климатические предикторы, определяющие распространение иксодовых клещей вида *I. ricinus*

САТ (порог 10°С), °С · сут	Средняя температура января, °С	Годовая сумма осадков, мм	Среднегодовая температура воздуха, °С	Совпадение наблюдаемого и рассчитанного ареалов (значение каппы Коэна)
> 1550	> -14.1	> 491	-	0.85

По наиболее распространенной градации соответствия значений каппа Коэна «качеству» совпадения двух рядов данных (Landis, Koch, 1977), значения этого показателя для европейского лесного клеща *I. ricinus* соответствуют почти полному совпадению его фактического и расчётного климатического ареалов.

На рис. 4 приведены совмещённые карты фактического и расчётного климатического ареалов исследуемого вида.

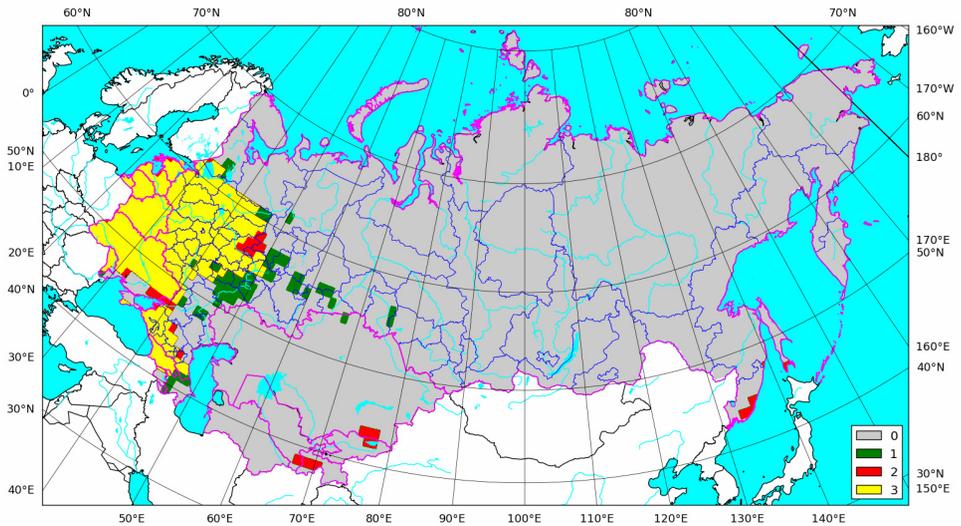


Рисунок 4. Фактический и расчётный климатический ареалы *I. ricinus* (1951-1980 гг.)
 Условные обозначения: 0 — территория вне обоих ареалов, 1 — только фактический ареал,
 2 — только расчётный ареал, 3 — совпадение ареалов (Попов, 2016)

Расчётный климатический ареал *I. ricinus* не включил в себя области на юго-востоке фактического ареала (50° - 55° с.ш., 44° - 51° в.д.) и его восточные области (55° - 57° с.ш., 50° - 75° в.д.). Последнее несовпадение можно объяснить тем, что большинство находок в данной области единичны и, по-видимому, имеют случайный характер (Филиппова, Панова, 1997). При этом наблюдаются области с благоприятными для существования вида климатическими параметрами на Тянь-Шане, Дальнем Востоке и юге о. Сахалин. Отсутствие находок особей *I. ricinus* в данных регионах можно объяснить удалённостью их от основного ареала. Но, несмотря на некоторые различия, можно признать удовлетворительным совпадение фактического и расчётного климатического ареалов.

Выявление климатогенных изменений ареалов видов

Описанную выше методологию можно также использовать для выявления наблюдаемого или ожидаемого смещения границ климатических ареалов климатозависимых видов, которое может быть связано с климатическими изменениями, происходящими в те или иные временные периоды. Для того, чтобы произвести подобные исследования, выбирают два (или более) временных интервала, между которыми необходимо провести подобное сравнение. Обычно это двадцатилетние или тридцатилетние временные срезы $[t_1, t_2]$, где t_1 – начальный год выбранного периода, а t_2 – его конечный год. Затем, по имеющимся базам климатических данных наземных (или дистанционных) метеонаблюдений рассчитывают установленные для исследуемого вида климатические предикторы для выбранных периодов времени для каждой точки географического пространства, по которой есть информация. Затем эти

результаты интерполируются на узлы регулярной пространственной сетки и с помощью картографической программы строится расчетный ареал (см. раздел «Данные и методы»). Для двух или более периодов времени сравнение расчетных ареалов делается визуально или же с помощью различных статистических методов (Попова, Попов, 2013; Popova et al, 2018).

Примером использования подобного метода может стать проведенное нами моделирование климатического ареала колорадского жука за два тридцатилетних периода времени: 1941-1970 гг. и 1981-2010 гг. (рис. 5).



Рисунок 5. Изменение границ климатического ареала колорадского жука в период 1981-2010 гг. относительно периода 1941-1970 гг.

- Условные обозначения: 1 – территория климатического ареала в оба периода;
 2 – приращение климатического ареала в 1981-2010 гг.;
 3 – климатический ареал в оба периода времени

На построенной картосхеме хорошо прослеживается смещение границы климатического ареала колорадского жука в северном, северо-восточном и, особенно, восточном направлениях. Именно эти территории заселены видом *L. decemlineata* в последние десятилетия (Popova, Semenov, 2013; Popova, 2014). Территория Приморского края, как видно из рис. 5, была пригодна для обитания *L. decemlineata* еще в период 1941-1970 гг., но оставалась не заселенной им вплоть до 2000 г., когда он был занесен сюда из других географических регионов и начал свое активное освоение новых районов (Мацешина, 2012).

Таким образом, этот метод позволяет оценить пригодность конкретной территории для существования даже чужеродного вида, который пока еще не вселился и не натурализовался в данном регионе. Это особенно важно для сельского хозяйства и здравоохранения при мониторинге степени опасности заселения регионов инвазивными видами.

Заключение

В статье представлено несколько методик построения климатических ареалов видов по выявленным различными методами (экспериментальными или расчетными) климатическим предикторам. Эти методики позволяют оценить пригодность территории для заселения как аборигенными видами, так и чужеродными инвазионными видами, которые пока еще отсутствуют в данном регионе. Также описана методика построения климатических ареалов видов для разных отрезков времени, что позволяет оценить изменение климатического ареала вида при изменении величин климатических предикторов. Решение этой задачи становится особенно актуальным в условиях меняющегося климата, когда границы распространения многих климатозависимых биологических видов смещаются. Особенно это важно в отношении опасных инвазионных видов, причиняющих существенных ущерб различным природным и антропогенным экосистемам и другим биологическим видам, в том числе и человеку. По большинству климатических прогнозов, при существующих темпах индустриализации и увеличении количества выбросов различных парниковых газов в атмосферу, в ближайшие десятилетия климатические изменения на территории России и соседних стран будут продолжаться, а, возможно, и превосходить по своей интенсивности и масштабам наблюдавшиеся в конце XX, начале XXI веков тенденции (Второй оценочный доклад..., 2014; IPCC, 2014).

Работа выполнена в рамках темы ФНИ гос. академий наук: Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России № 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2, при поддержке Программы Президиума РАН № 51 "Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования" и в соответствии с проектом Росгидромета 1.3.3.1.

Список литературы

Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребаяев В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И. 2005. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации. – В сб.: Труды НИЦ «Планета», вып.1(46). – М., Росгидромет, с. 3-21.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. / Под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова. – М., Росгидромет, 1008 с.

Злотников М. Д. 1967. Возможный ареал распространения и сроки развития колорадского жука в Европейской части СССР. – Труды Всесоюзного научно-исследовательского ин-та защиты растений, вып. 27, с. 68–74.

Колорадский картофельный жук *Leptinotarsa decemlineata* Say. 1981. /Под ред. Р. С. Ушатинской. – М., Наука, 337 с.

Коренберг Э.И. 2004. Экологические предпосылки возможного влияния изменений климата на природные очаги и их эпидемическое проявление. –

В сб.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов международного семинара (5-6 апреля 2004 г.) /под ред. Н.Ф. Измерова, Б.А. Ревича, Э.И. Коренберга. – М., Издательское товарищество «АдамантЪ», с. 54-67.

Коренберг Э.И. 2008. Современные черты природной очаговости клещевого энцефалита: новые или хорошо забытые? – Медицинская паразитология и паразитарные болезни, № 3, с. 3-8.

Коренберг Э.И., Ковалевский Ю.В. 1981. Районирование ареала вируса клещевого энцефалита. – Итоги науки и техники: серия «Медицинская география», т. 11. – М., ВИНТИ, 148 с.

Коротков Ю.С. 2005. Постепенная изменчивость паразитарной системы клещевого энцефалита. – Вопросы вирусологии, т. 50, № 3, с. 52-56.

Коротков Ю.С., Кисленко Г.С., Буренкова Л.А., Рудникова Н.А., Карань Л.С. 2008. Пространственная и временная изменчивость зараженности клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* возбудителем болезни Лайма в Московской области. – Паразитология, т. 42, № 6, с. 441-451.

Мацишина Н. В. 2012. Особенности биологии и экологии колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* (Say, 1824) (Coleoptera, Chrysomelidae) в Приморском крае. – Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Владивосток, 19 с.

Попов И.О. 2016. Климатически обусловленные изменения аутэкологических ареалов иксодовых клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* на территории России и стран ближнего зарубежья. – Дис. ... канд. биол. наук. – М., 115 с.

Попов И. О., Титкина С. Н., Семенов С. М., Ясюкевич В. В. 2013. Модельные оценки распространения переносчиков некоторых болезней человека в XXI веке в России и соседних странах. – В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 25, – М., ИГКЭ, с. 395-427.

Попова Е.Н. 2017. Влияние изменений климата на распространение сельскохозяйственных вредителей в Дальневосточном регионе. – Отчет о проведении 4-го форума по вопросам сотрудничества в сопредельных районах Японии и России в области сохранения экосистем (25-26 октября 2016 г., Москва, Министерство природных ресурсов и экологии РФ), с. 38-42. <http://www.sizenken.biodic.go.jp/nichiro/houkoku161025,26.pdf>

Попова Е. Н., Попов И. О. 2013. Климатические факторы, определяющие границы ареалов вредителей и возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, и расчетные методы оценки изменения ареалов при изменении климата. – В сб.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 25. – М., ИГКЭ, с. 175-204.

Семенов С.М., Гельвер Е.С. 2002. Изменение годового хода среднесуточной температуры воздуха на территории России в XX веке. – Доклады РАН, сер. Геофизическая, т. 386, № 3, с. 389-394.

Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С. 2006. Выявление климатогенных изменений. – М., Изд.центр «Метеорология и гидрология», 324 с.

Таежный клещ *Ixodes persulcatus* Schulze (Acarina, Ixodidae). Морфология, систематика, экология, медицинское значение. 1985. – Л., Издательство «Наука», Ленинградское отделение, 416 с.

Филиппова Н.А. 1977. Иксодовые клещи подсем. Ixodinae. Фауна СССР. Паукообразные. Т. IV, вып. 4. – Л., «Наука», 393 с.

Филиппова Н.А., Панова И.В. 1997. Географическая изменчивость половозрелой фазы *Ixodes ricinus* (Ixodidae) в восточной части ареала. – Паразитология, т. 31, вып. 5, с. 377-390.

Boslaugh S. 2013. Statistics in a Nutshell. – O'Reilly. Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Sebastopol, Tokyo, 569 p.

Huntley B., Berry P.M., Cramer W., McDonald A.P. 1995. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces. – Journal of Biogeography, vol. 22, pp. 967-1001.

IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Landis J.R., Koch G.G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. – Biometrics, vol. 33, pp. 159-174.

MODIS data products – MODIS Web – NASA. – Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> (accessed 31 January 2019).

Monserud R.A., Leemans R. 1992. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. – Ecological Modelling, vol. 62, pp. 275-293.

Soberón J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. – Ecology Letters, No. 10, pp. 1115-1123.

Peterson A.T., Soberón J., Pearson R.G., Anderson R.P., Martínez-Meyer E., Nakamura M., Araújo M.B. 2011. Ecological Niches and Geographic Distributions. – Princeton University Press, Princeton and Oxford, 314 p.

Popova E. N. 2014. The Influence of Climatic Changes on Range Expansion and Phenology of the Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*, Coleoptera, Chrysomelidae) in the Territory of Russia. – Entomological Review, vol. 94, No. 5, pp. 643-653.

Popova E. N., Popov I. O., Semenov S. M. 2018. Assessment of Variations in the Annual Sum of Active Temperatures and Total Precipitation during the Vegetation Period in Russia and Neighboring Countries. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 43, No. 6, pp. 412-417.

Popova E.N, Semenov S.M., 2013. Current and expected changes in Colorado beetle climatic habitat in Russia and neighboring countries. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 38, No. 7, pp. 509-514.

Popova E. N., Yasyukevich V. V., Popov I. O. 2017. On the correct use of cumulative applied climate indices for studying biological objects. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 42, No. 10, pp. 661-664.

Porretta D., Mastrantonio V., Amendolia S., Gaiarsa S., Epis S., Genchi C., Bandi C., Otranto D., Urbanelli S. 2013. Effects of global changes on the climatic niche of the tick *Ixodes ricinus* inferred by species distribution modelling. – Parasites & Vectors, vol. 6, No. 1, 8 p.

Trouvelot B., 1936. Le doryphore de pomme de terre en Amérique du Nord. – Ann. Epiphyt., N. S., vol. 1, pp. 277-336.

Статья поступила в редакцию: 27.02.2019 г.

После переработки: 18.03.2019 г.

MODELING OF POTENTIAL CLIMATIC RANGES OF BIOLOGICAL SPECIES AND THEIR CLIMATE-DRIVEN CHANGES

E.N. Popova^{1,2)}, *I.O. Popov*^{2)*}

¹⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 119017, Moscow, Russian Federation; *en_popova@mail.ru*

²⁾ Yu.A. Izrael' Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation; **igor_o_popov@mail.ru*

Abstract. The climatic range of a species is a part of geographical space, each point of which is characterized by climatic conditions that allow for sustainable habitation of its populations. Climate change causes changing in climatic ranges. The article presents several methods for modeling climatic ranges of biological species. The techniques allow assessing the suitability of the territory for colonization by both native species and alien invasive species that are not yet present in the area. The techniques were applied to the calculations of current and projected climatic changes of the *Colorado potato beetle* and the *European forest tick* in the 21st century.

Keywords. Modeling of ranges, climatic range, climatic predictors, climate change.

References

Asmus V.V., Dyadyuchenko V.N., Zagrebaev V.A., Makridenko L.A., Milekhin O.E., Soloviev V.I. 2005. Nazemnyj kompleks priema, obrabotki, arhivacii i rasprostraneniya sputnikovoj informacii [Terrestrial complex for receiving, processing, archiving and distribution of satellite information]. *Trudy NIC «Planeta» – Proc. SRC “Planeta”*, vol. 1(46). Moscow, pp. 3-21.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. 2014. Ed. V.M. Kattsov and S.M. Semenov. Moscow, 1008 p.

Zlotnikov M. D., 1967. Vozmozhnyj areal rasprostraneniya i sroki razvitiya koloradskogo zhuka v Evropejskoj chasti SSSR [Possible distribution area and timing of development of the Colorado potato beetle in the European part of the USSR]. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo in-ta zashchity rastenij – Proc. The All-Union Scientific Research Institute for Plant Protection*, vol. 27, pp. 68-74.

Koloradskij kartofel'nyj zhuk Leptinotarsa decemlineata Say [The Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* Say]. 1981. Ed. R.S. Ushatinskaya. Moscow, 337 p.

Korenberg E.I. 2004. *Ekologicheskie predposylki vozmozhnogo vliyaniya izmenenij klimata na prirodnye ochagi i ih epidemicheskoe proyavlenie* [Ecological prerequisites of the possible influence of climate change on natural foci and their epidemic manifestation]. *Izmenenie klimata i zdorov'e Rossii v XXI veke. Sbornik materialov mezhdunarodnogo seminara (5-6 aprelya 2004)* [Climate change and health in Russia in the XXI century. Collection of materials of the International seminar (April 5-6, 2004)]. Ed. N.F. Measure, B.A. Revich, E.I. Korenberg. Moscow, pp. 54- 67.

Korenberg E.I. 2008. *Sovremennye cherty prirodnoj ochagovosti kleshchevogo encefalita: novye ili horosho zabytye?* [Modern features of natural foci of tick-borne encephalitis: new or well forgotten?]. *Medicinskaya parazitologiya i parazitarnye bolezni – Medical parasitology and parasitic diseases*, no. 3, pp. 3-8.

Korenberg E.I., Kovalevskij Yu.V. 1981. *Rajonirovanie areala virusa kleshchevogo encefalita* [Tick-borne encephalitis virus zoning]. *Itogi nauki i tekhniki: seriya «Medicinskaya geografiya» – Results of science and technology: the series "Medical Geography"*, vol. 11, Moscow, 148 p.

Korotkov Yu.S. 2005. *Postepennaya izmenchivost' parazitarnoj sistemy kleshchevogo encefalita* [Gradual variability of tick-borne encephalitis parasitic system]. *Voprosy virusologii – Virology issues*, vol. 50, no. 3, pp. 52-56.

Korotkov Yu.S., Kislenco G.S., Burenkova L.A., Rudnikova N.A., Karan' L.S. 2008. *Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost' zarazhennosti kleshchej Ixodes ricinus i Ixodes persulcatus vobuditelem bolezni Lajma v Moskovskoj oblasti* [Spatial and temporal variability of infection of ticks *Ixodes ricinus* and *Ixodes persulcatus* by Lyme disease pathogen in the Moscow region]. *Parazitologiya – Parasitology*, vol. 42, no. 6, pp. 441-451.

Macishina N. V. 2012. *Osobennosti biologii i ekologii koloradskogo zhuka Leptinotarsa decemlineata (Say, 1824) (Coleoptera, Chrysomelidae) v Primorskom krae* [Features of the biology and ecology of the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Say, 1824) (Coleoptera, Chrysomelidae) in the Primorye Territory]. Extended abstract of candidate's thesis. Vladivostok, 19 p.

Popov I.O. 2016. *Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya avtekolozicheskikh arealov iksodovykh kleshchej Ixodes ricinus i Ixodes persulcatus na territorii Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya* [Climate-related changes in the autoecological ranges of Ixodes ticks *Ixodes ricinus* and *Ixodes persulcatus* in Russia and neighboring countries]. Candidate's thesis. Moscow, 115 p.

Popova E.N. 2017. *Vliyanie izmenenij klimata na rasprostranenie sel'skokozyajstvennykh vreditelej v Dal'nevostochnom regione* [The impact of climate change on the spread of pests in the Far Eastern region]. *Otchet o provedenii 4-go foruma po voprosam sotrudnichestva v sopredel'nykh rajonah Yaponii i Rossii v oblasti sohraneniya ekosistem (25-26 oktyabrya 2016, Moskva, Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii RF)* [Report on the 4th forum on cooperation in the adjacent areas of Japan and Russia in the field of ecosystem

conservation (October 25-26, 2016, Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation)], pp. 38-42. <http://www.sizenken.biodic.go.jp/nichiro/houkoku161025,26.pdf>

Popova E.N., Popov I.O. 2013. Klimaticheskie faktory, opredelyayushchie granicy arealov vreditel'ej i vzbuditelej boleznej sel'skohozyajstvennyh rastenij, i raschetnye metody ocenki izmeneniya arealov pri izmenenii klimata [Climatic factors determining ranges of agricultural pests and agents of plant diseases and model methodology for assessment of change in ranges]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem – Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. 25, pp. 175-204.

Popov I.O., Titkina S.N., Semenov S.M., Yasyukevich V.V. 2013. Model'nye ocenki rasprostraneniya perenoschikov nekotoryh boleznej cheloveka v XXI veke v Rossii i sosednih stranah [Model assessment of distribution for vectors of some human diseases in XXI century in Russia and neighboring countries]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem – Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. 25, pp. 395-427.

Semenov S.M., Gel'ver E.S. 2002. Izmenenie godovogo hoda srednesutochnoj temperatury vozduha na territorii Rossii v XX veke [Changes in the annual course of the average daily air temperature in Russia in the XX century]. *Doklady RAN, seria Geofizicheskaya – Dokl. Earth Sciences*, vol. 386, no. 3, pp. 389–394.

Semenov S.M., Yasyukevich V.V., Gel'ver E.S. 2006. *Vyyavlenie klimatogennyh izmenenij* [Detection of climatogenic changes]. Moscow, 324 p.

Taehnyj kleshch Ixodes persulcatus Schulze (Acarina, Ixodidae). Morfologiya, sistematika, ekologiya, medicinskoe znachenie [Taiga tick *Ixodes persulcatus* Schulze (Acarina, Ixodidae). Morphology, taxonomy, ecology, medical value]. 1985. Leningrad, 416 p.

Filippova N.A. 1977. *Iksodovye kleshchi podsem. Ixodinae. Fauna SSSR. Paukoobraznye* [Ixodid ticks of subfamily Ixodinae. The fauna of the USSR. Arachnids], vol. IV, issue 4. Leningrad, 393 p.

Filippova N.A., Panova I.V. 1997. Geograficheskaya izmenchivost' polovozreloj fazy *Ixodes ricinus* (Ixodidae) v vostochnoj chasti areala [Geographical variability of the mature phase of *Ixodes ricinus* (Ixodidae) in the eastern part of the range]. *Parazitologiya – Parasitology*, vol. 31, issue 5, pp. 377-390.

Boslaugh S. 2013. *Statistics in a Nutshell*. – O'Reilly. Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Sebastopol, Tokyo, 569 p.

Huntley B., Berry P.M., Cramer W., McDonald A.P. 1995. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces. – *Journal of Biogeography*, vol. 22, pp. 967-1001.

IPCC 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

on Climate Change /Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Landis J.R., Koch G.G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. – Biometrics, vol. 33, pp. 159-174.

MODIS data products – MODIS Web – NASA. – Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> (accessed 31 January 2019).

Monserud R.A., Leemans R. 1992. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. – Ecological Modelling, vol. 62, pp. 275-293.

Soberón J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. – Ecology Letters, No. 10, pp. 1115-1123.

Peterson A.T., Soberón J., Pearson R.G., Anderson R.P., Martínez-Meyer E., Nakamura M., Araújo M.B. 2011. Ecological Niches and Geographic Distributions. – Princeton University Press, Princeton and Oxford, 314 p.

Popova E. N. 2014. The Influence of Climatic Changes on Range Expansion and Phenology of the Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*, Coleoptera, Chrysomelidae) in the Territory of Russia. – Entomological Review, vol. 94, No. 5, pp. 643-653.

Popova E. N., Popov I. O., Semenov S. M. 2018. Assessment of Variations in the Annual Sum of Active Temperatures and Total Precipitation during the Vegetation Period in Russia and Neighboring Countries. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 43, No. 6, pp. 412-417.

Popova E.N, Semenov S.M., 2013. Current and expected changes in Colorado beetle climatic habitat in Russia and neighboring countries. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 38, No. 7, pp. 509-514.

Popova E. N., Yasyukevich V. V., Popov I. O. 2017. On the correct use of cumulative applied climate indices for studying biological objects. – Russian Meteorology and Hydrology, vol. 42, No. 10, pp. 661-664.

Porretta D., Mastrantonio V., Amendolia S., Gaiarsa S., Epis S., Genchi C., Bandi C., Otranto D., Urbanelli S. 2013. Effects of global changes on the climatic niche of the tick *Ixodes ricinus* inferred by species distribution modelling. – Parasites & Vectors, vol. 6, No. 1, 8 p.

Trouvelot B., 1936. Le doryphore de pomme de terre en Amérique du Nord. – Ann. Epiphyt., N. S., vol. 1, pp. 277-336.