

Т.А. Автаева<sup>1</sup>, А.В. Скрипчинский<sup>2</sup>, Д.В. Иванов<sup>3</sup>, Р.А. Суходольская<sup>4</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРКЕРНЫХ ВИДОВ ЖУЖЕЛИЦ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

### АННОТАЦИЯ

Изменение климата и связанные с ним изменения природных экосистем являются важнейшими международными проблемами XXI в. В связи с этим моделирование динамики ареалов растений и животных на основе анализа их связей с климатическими параметрами и характеристиками среды становится актуальной задачей. Моделирование географического распространения видов невозможно без геоинформационного анализа, позволяющего выявить как границы факторов, влияющих на распространение вида, так и особенности его ареала.

В работе приводится авторское дополнение к существующей методике эколого-географического моделирования на основе ГИС-технологий, позволяющих визуализировать динамику ареалов в некотором промежутке времени и в связи с изменением биоклиматических параметров.

Моделирование пространственного распространения двух маркерных видов жуужелиц даёт возможность экстраполировать фрагментарные данные о конкретных местонахождениях на значительные территории. Созданные геоинформационные модели прогнозируемых ареалов выявили их изменения по разным климатическим сценариям на 2050 и 2070 гг.

На основании эколого-геоинформационного моделирования было установлено, что на формирование современного ареала *Zabrus tenebrioides* оказывает значимое влияние средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, максимальная температура наиболее тёплого месяца и минимальная температура наиболее холодного месяца. На распространение *Pterostichus oblongopunctatus* оказывают влияние средняя годовая температура, средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, средняя температура наиболее сухого квартала, средняя температура самой тёплой четверти года и сумма осадков в самом сухом месяце года. Проведённый геоинформационный анализ позволил выявить зависимость количества точек находок видов и значений биоклиматических факторов, созданы карты и графики диапазона комфортности обитания видов. Выявлены основные тренды изменения ареала *Pterostichus oblongopunctatus* в условиях изменяющегося климата по «мягкому» и «жёсткому» сценариям. Под влиянием климатических изменений сокращается площадь ареалов и меняется их структура.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** биоклиматические параметры, ГИС-моделирование, пространственное распространение, маркерные виды жуужелиц, геоинформационные системы

<sup>1</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, Отдел биологических исследований, Старопромысловское ш., д. 21 А, 364051, Грозный, Чеченская Республика, Россия; e-mail: avtaeva1971@mail.ru

<sup>2</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Институт математики и естественных наук, ул. Пушкина, д. 1, 355009, Ставрополь, Россия; e-mail: ron1975@list.ru

<sup>3</sup> Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, ул. Даурская, 28420087, Казань, Россия; e-mail: water-rf@mail.ru

<sup>4</sup> Институт проблем экологии и недропользования АН Республики Татарстан, ул. Даурская, 28420087, Казань, Россия; e-mail: sukhodolskayaraisa@gmail.com

**Tamara A. Avtaeva<sup>1</sup>, Andrey V. Skripchinsky<sup>2</sup>, Dmitriy V. Ivanov<sup>3</sup>,  
Raisa A. Sukhodolskaya<sup>4</sup>**

## **MODELING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF MARKER SPECIES OF GROUND BEETLES BASED ON GIS TECHNOLOGIES**

### **ABSTRACT**

Climate change and related changes in natural ecosystems are the most important international issues of the twenty-first century. In this regard, modeling the dynamics of plant and animal habitats based on the analysis of their relationships with climate parameters and environmental characteristics becomes an urgent task. Modeling the geographical distribution of species is not possible without geoinformation analysis, which allows you to identify both the boundaries of factors that affect the distribution of the species, and the features of its range.

The paper presents the author's addition to the existing method of ecological and geographical modeling based on GIS technologies that allow to visualize the dynamics of areas in a certain period of time and in connection with changes in bioclimatic parameters.

Modeling the spatial distribution of two marker species of ground beetles makes it possible to extrapolate fragmentary data on specific locations over large territories. The created geoinformation models of the predicted areas revealed their changes for different climate scenarios for 2050 and 2070.

Based on ecological and geoinformation modeling, it was found that the formation of the modern range of *Zabrus tenebrioides* is significantly influenced by the average daily temperature amplitude for each month, the maximum temperature of the warmest month and the minimum temperature of the coldest month. The distribution of *Pterostichus oblongopunctatus* is influenced by the average annual temperature, the average daily temperature amplitude for each month, and the average temperature of the driest quarter; the average temperature of the warmest quarter of the year and the amount of precipitation in the driest month of the year. The geoinformation analysis made it possible to identify the dependence of the number of points of species finds and the values of bioclimatic factors. Maps and graphs of the range of species comfort were created. The main trends of changes in the range of *Pterostichus oblongopunctatus* under changing climate conditions in the "soft" and "hard" scenarios are revealed. Under the influence of climate change, the area of habitats is reduced and their structure is changed.

**KEYWORDS:** bioclimatic parameters, GIS modeling, spatial distribution, marker species of ground beetles, geoinformation system

### **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ закономерностей географического распространения биологических объектов является фундаментальной научной проблемой, которая тесно связана с историей формирования биосферы. В то же время исследования такого рода могут играть ключевую роль в прогнозировании динамических изменений экосистем в контексте глобальной и локальной эволюции природной среды. Познание этих закономерностей предоставляет возможности оценки перспектив дальнейшего существования видов и

<sup>1</sup> Kh.I. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Biological Research, Staropromyslovskoe Hwy, 21A, Grozny, Chechen Republic, Russia; *e-mail*: [avtaeva1971@mail.ru](mailto:avtaeva1971@mail.ru)

<sup>2</sup> North Caucasus Federal University, Institute of Mathematics and Natural Sciences, Pushkin str., 1, 355009, Stavropol, Russia; *e-mail*: [ron1975@list.ru](mailto:ron1975@list.ru)

<sup>3</sup> Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Daurskaya str., Kazan, Russia; *e-mail*: [water-rf@mail.ru](mailto:water-rf@mail.ru)

<sup>4</sup> Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, Daurskaya str., Kazan, Russia; *e-mail*: [sukhodolskayaraisa@gmail.com](mailto:sukhodolskayaraisa@gmail.com)

типов биоценозов, а также характера их ареалов под влиянием различных факторов. В настоящее время в связи с разработкой новых методов появилась возможность моделирования динамики ареалов видов растений и животных на основе анализа связей с климатическими параметрами, геосистемными характеристиками и структурой основных местообитаний [Guisan, Zimmermann, 2000; Douma et al., 2012 и др.]. Ряд моделей также охватывает особенности распространения видов в зависимости от условий природопользования и инвазионных характеристик [Guisan, Thuiller, 2005]. В современных исследованиях большое внимание уделяется моделированию географического распространения биологических видов методом максимальной энтропии на базе программного пакета MaxEnt [Phillips, Dudik, 2008].

Распространение видов, как и сообществ живых организмов, в значительной степени определяется их экологическими потребностями и особенностями пространственного распределения важнейших лимитирующих их распространение факторов среды по земной поверхности. Основными зональными экологическими факторами, лимитирующими распространение биологических объектов, являются прежде всего климатические факторы среды: температура, свет, влажность.

Методы экологического моделирования позволяют выделить области, подходящие по своим климатическим характеристикам для обитания вида как в прошлом, так и настоящем. Моделирование будущего распространения необходимо с точки зрения прогноза состояния вида в контексте глобальных изменений климата и ландшафтов. Географическая составляющая экологических моделей реализуется через данные распространения видов и климатических характеристик в виде полей непрерывного распространения.

В последние годы проводится всё больше исследований по данной тематике, как зарубежными исследователями, так и отечественными. Анализ зарубежных источников литературы позволяет заключить, что в настоящее время накоплен значительный опыт моделирования как потенциальных мест обитания видов в настоящее время, так и прогнозных ареалов с учётом различных климатических сценариев [Yang et al., 2013; Aili et al., 2017; Huyong et al., 2020]. В ряде работ приводятся оригинальные картографические модели, иллюстрирующие пространственную трансформацию центроидов экологической пригодности территории в зависимости от сценариев изменения климата [Portilla Cabrera, Selvaraj, 2020; Yuanjun et al., 2018].

Ряд работ российских учёных посвящен исследованию пространственного распространения как растительных организмов, так и животных, причём как массовых, так и узкоспециализированных [Yuanjun et al., 2018; Zhang et al., 2019; Дудов, 2016; Рахматуллина и др., 2017; Болотов, Фролов, 2015].

Существует ряд учебных пособий, в которых авторы приводят подробные инструкции, позволяющие применять ГИС-технологии в экологических исследованиях. Среди них можно выделить пособия, подготовленные и изданные коллегами в Санкт-Петербурге и Томске. В методическом пособии «Биоклиматическое моделирование»<sup>1</sup> детально описываются этапы подготовки данных как для программного продукта MaxEnt, так и для DIVA-GIS, моделирования, оценки и визуализации полученных данных. Геоинформационная система DIVA-GIS используется для анализа данных биоразнообразия и имеет ограниченный функционал пространственного анализа.

В работе Афонина, Соколовой (2018)<sup>2</sup> значительная часть пособия посвящена теоретическим основам геоинформационных технологий и эколого-географического

<sup>1</sup> Олонова М.В., Гудкова П.Д. Биоклиматическое моделирование: задания для практической работы и методические указания к их выполнению. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. 50 с.

<sup>2</sup> Афонин А.Н., Соколова Ю.В. Эколого-географический анализ и моделирование распространения биологических объектов с использованием ГИС. Учебное пособие (Практикум). СПб: ВВМ, 2018. 121 с.

анализа и моделирования. В практикуме авторами детально рассматриваются особенности технологии работы с QGIS. Данное пособие рассчитано на людей, не имеющих навыков работы с геоинформационными системами.

Таким образом, в современной науке широкое распространение получило моделирование пространственного распространения видов, позволяющее установить связь местонахождений видов в природе и факторов окружающей среды и прогнозировать таким образом распространение видов. В связи с этим активизация исследований в этом направлении на территории России имеет первостепенное значение. Целью нашего исследования является интерпретация, апробация и внедрение существующей методики применительно к насекомым (на примере жуков-жужелиц).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для моделирования пространственного распределения были выбраны 2 массовых вида жужелиц (*Coleoptera, Carabidae*): *Zabrus tenebrioides* и *Pterostichus oblongopunctatus*.

*Zabrus tenebrioides* — опасный вредитель зерновых культур, который способен нанести большой урон посевам ячменя, пшеницы, ржи, кукурузы. Вредят как сами жуки, так и их личинки. В работе нами сделана попытка провести анализ распространения хлебной жужелицы в пространстве экологических факторов среды и выявить основные лимитирующие факторы, а также сформулировать закономерности распространения данного вида. На материале собственных полевых сборов, данных базы Global Biodiversity Information Facility (GBIF)<sup>1</sup> и анализе литературных источников получено 279 точек обитания хлебной жужелицы.

*Pterostichus oblongopunctatus* (Fabricius, 1787) — транспалеарктический вид, распространённый от Северной и Центральной Европы до Кавказа и Сибири на восток до Japan [Kryzhanovskij et al., 1995; Hurka, 1996; Bousquet, 2003]. Это один из обычных лесных видов жужелиц на юге лесной, в лесостепной и на севере степной зон Евразии. На юге ареала он достоверно увеличивает численность в условиях 40–100 % сомкнутости крон деревьев, на суглинистых почвах, при средних уровнях минерализации почвенного раствора. Встречаемость вида в лесных экосистемах степной зоны Украины — 19,5 % всех обследованных лесных экосистем региона [Brygadyrenko, 2016].

В процессе эколого-географического моделирования можно выделить три этапа: сбор информации о распространении видов, моделирование и геоинформационный анализ полученных результатов. Технология выполнения моделирования пространственного распределения изученных видов включала ряд шагов:

### I. Сбор информации.

1. Сбор данных по точкам из открытой глобальной базы GBIF по результатам полевых сборов и литературным данным. Чем больше точек, тем точнее модель. Особое внимание важно обратить на точность координат.

2. Формирование базы данных в программе Excel и перевод её в формат csv.

### II. Моделирование.

3. Моделирование в MaxEnt по разным климатическим сценариям. Выявление наиболее значимых для данного вида факторов. Моделирование по значимым факторам.

### III. Геоинформационный анализ.

4. Создание точечного слоя на основе растра.

5. На основании полученного точечного слоя были построены полигоны, отражающие диапазон комфортности обитания данного вида.

6. Совмещение полигонального слоя диапазонов комфортности обитания вида с точками находок и определение их количества.

7. Построение карт по наиболее значимым биоклиматическим параметрам и

<sup>1</sup> GBIF.org (14 August 2018) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.example-donotcite>

графиков, отражающих зависимость значений фактора от количества точек присутствия вида.

8. Построение карт прогнозируемых ареалов по климатическим сценариям и расчёт их площади.

На этапе сбора информации использовались данные из открытой базы данных GBIF, литературные данные и собственные полевые сборы. На данном этапе очень важен объём точек присутствия вида и их качество [Санданов, 2019]. В нашей работе производилась проверка исходных точек нахождения видов в программе Google Earth Pro, путем создания точечного слоя из текстового файла. В последствие точки присутствия были переведены в формат \*.kml и визуализированы (рис. 1). За счёт такой проверки были выявлены ошибки в координатах точек, за счет их ручного ввода.

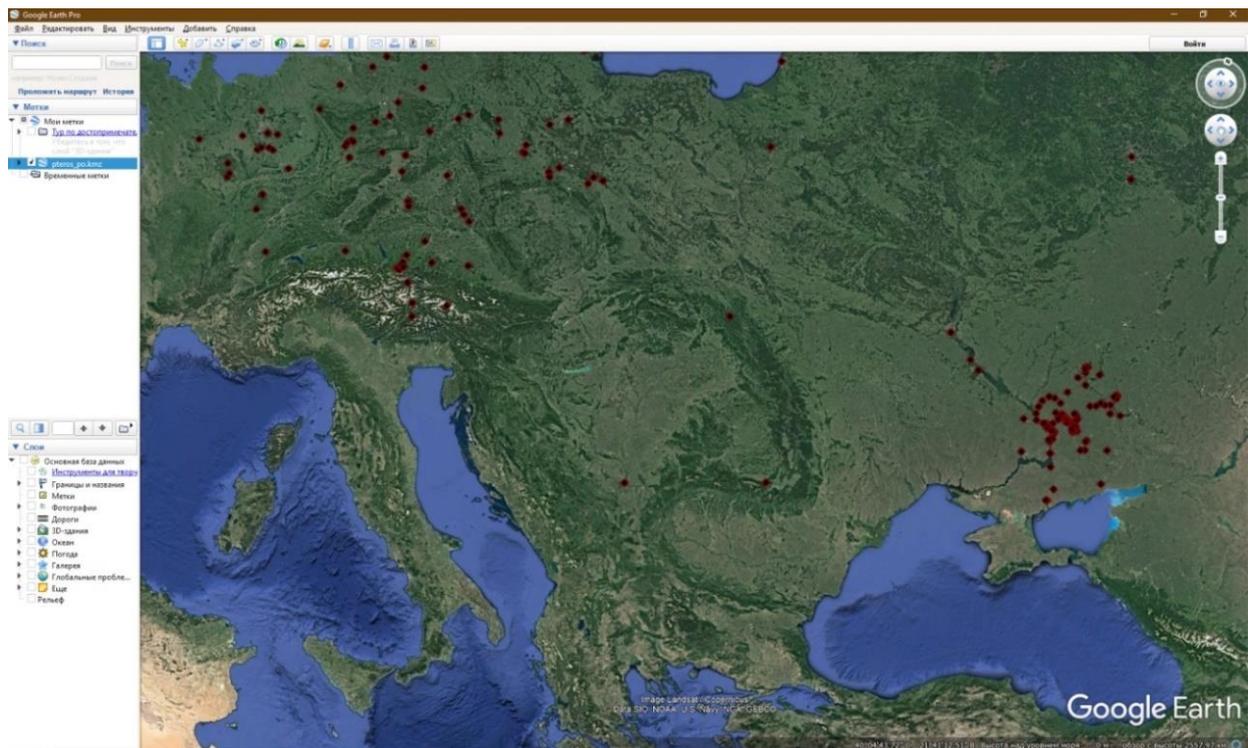


Рис. 1. Проверка пространственного расположения точек в программе Google Earth Pro  
 Fig. 1. Check the spatial location of the points in the program Google Earth Pro

На этапе моделирования в программе MaxEnt мы останавливаться не будем, поскольку особенности работы с ней описаны подробно в литературе. Более подробно рассмотрим методику геоинформационного анализа результатов моделирования, базирующиеся на программном обеспечении QGIS.

При моделировании нами использованы программа MaxEnt 3.4.1. и климатические данные WorldClim<sup>1</sup>, полученные путём интерполяции среднемесячных климатических данных метеостанций планеты. Они представляют собой набор растровых изображений (GRID), в каждой ячейке которых содержится информация о том или ином климатическом показателе.

В качестве переменных при моделировании использовали 19 «биоклиматических» показателей (БКП) из базы WorldClim с пространственным разрешением 30 секунд (~ 1 км<sup>2</sup>).

<sup>1</sup> WorldClim — Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS. Электронный ресурс: [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org) (дата обращения 24.10.2019)

Для анализа изменения ареала *P. oblongopunctatus* использованы биоклиматические данные за 1960–1990 гг. (version 1.4 WorldClim), биоклиматические данные за 1970–2000 гг. (version 2 WorldClim), а также два сценария «низких эмиссий» RCP 2.6 и «высоких эмиссий» RCP 8.5 из четырёх прогнозных сценариев RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, получивших название «representative concentrations pathways». При моделировании нами были использованы 19 «биоклиматических показателей» из базы WorldClim.

Полученные данные в виде растровых моделей в формате \*.asc были экспортированы в формат \*.GeoTiff. В дальнейшем растры были преобразованы в точечный слой, имеющий несколько миллионов объектов, с использованием инструментов Saga. На основании точечного слоя создавался полигональный слой с использованием модуля Contur. Нами выбирались диапазоны комфортности обитания с шагом 0,1, что позволило создавать детальные карты (рис. 2).

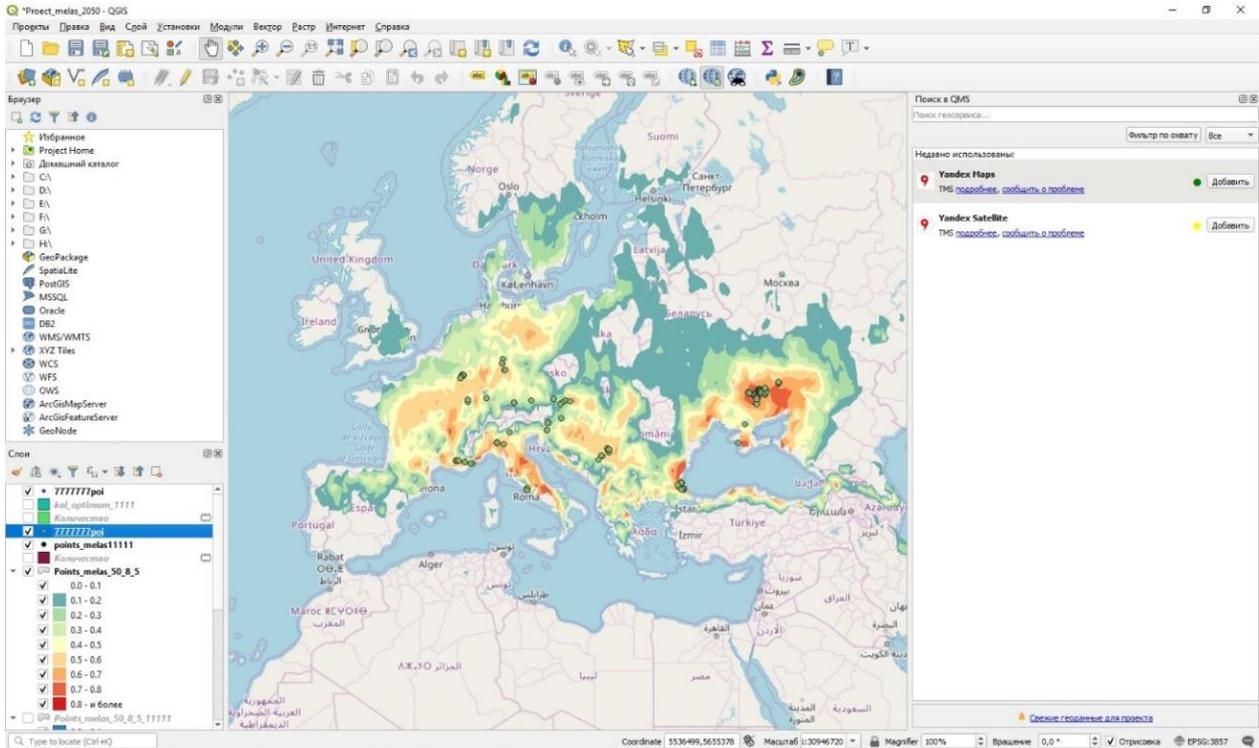


Рис. 2. Полигональный слой в QGIS с диапазоном комфортности обитания  
 Fig. 2. Polygon layer in QGIS with a range of comfort

Следующим этапом анализа явилось совмещение точек находок вида с созданными диапазонами комфортности. Для подсчёта количества точек в полигонах нами использовался инструмент анализа в QGIS. В дальнейшем в программе Excel мы работали с файлом в формате \*.dbf из созданного нами \*.shp файла.

При создании карт по наиболее значимым биоклиматическим параметрам использовалась технология, описанная выше. Для уточнения создаваемых карт использовался алгоритм, позволяющий уточнять значения климатических факторов. Суть его заключается в следующем. Созданные нами диапазоны значений климатических факторов не всегда были корректными, поскольку заранее «предугадать» значения факторов не представляется возможным. Количество точек находок вида не всегда находилось в указанных нами диапазонах. После первичного построения диапазонов нами производилась их корректировка и строились графики, отражающие связь наиболее точных значений фактора от количества находок вида (рис. 3).

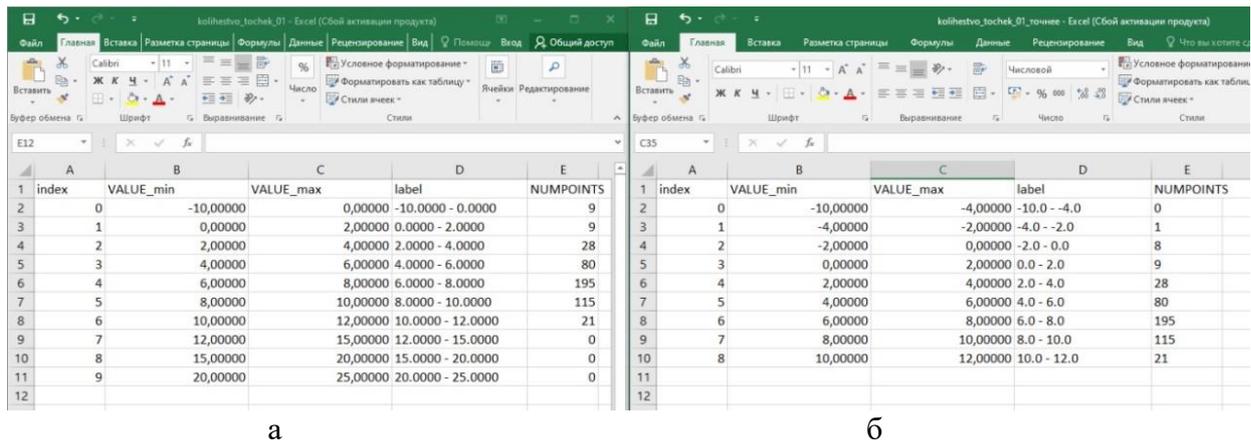


Рис. 3. Рассчитанные диапазоны значений фактора и количество точек находок вида: а — исходное; б — с учётом корректировки

Fig. 3. The calculated ranges of the factor values and the number of points of finds of the species: a — the original; b — taking into account the adjustment

В программе QGIS по данным, полученным по каждому климатическому сценарию, строили ареалы видов по прогнозу на 2050 и 2070 гг. в связи с изменением климата. Для этого использовали два пороговых значения — верхнее значение равно 1, а нижнее пороговое значение соответствует пороговому значению для 10 перцентилей обучающей выборки (указано в таблице пороговых значений программы MaxEnt).

С использованием модуля Contour были построены полигоны, где минимальным явилось значение для 10 перцентилей и максимальное значение 1. Таким образом, были созданы ареалы 2000, 2050 и 2070 гг. Впоследствии для их анализа были рассчитаны их площади и построены карты с использованием различных растровых картографических подложек модуля QuickMapServices.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом максимальной энтропии в программе MaxEnt были получены карты наиболее вероятных областей распространения *Zabrus tenebrioides* и *Pterostichus oblongopunctatus*. Выявлены наиболее значимые абиотические факторы, играющие решающую роль в распространении обоих видов.

Так, было установлено, что на формирование современного ареала *Zabrus tenebrioides* влияет средняя годовая температура воздуха (42,6 %), средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, максимальная температура наиболее тёплого месяца и минимальная температура наиболее холодного месяца. Температура почвы тесно связана с температурой воздуха и её понижение до  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ограничивает распространение жуков. Одним из определяющих факторов является сумма активных температур. Чтобы проследить эту зависимость нами был использован растровый слой суммы активных температур<sup>1</sup> и слой с точками находок (рис. 4).

Основное количество точек находок вида размещается в зоне континентального климата, где суммы эффективных температур лежат в диапазоне 2907–3634 °С. Часть точек размещается в прибрежной зоне с характерным морским климатом. Диапазон суммы эффективных температур лежит в пределах от 4360 до 5087 °С. Возможно, что более высокие суммы эффективных температур компенсируются за счёт повышенной влажности.

<sup>1</sup> O-GIS. Электронный ресурс: <http://app.o-gis.org/o-gis/web/app.php/> (дата обращения 10.09.2019)

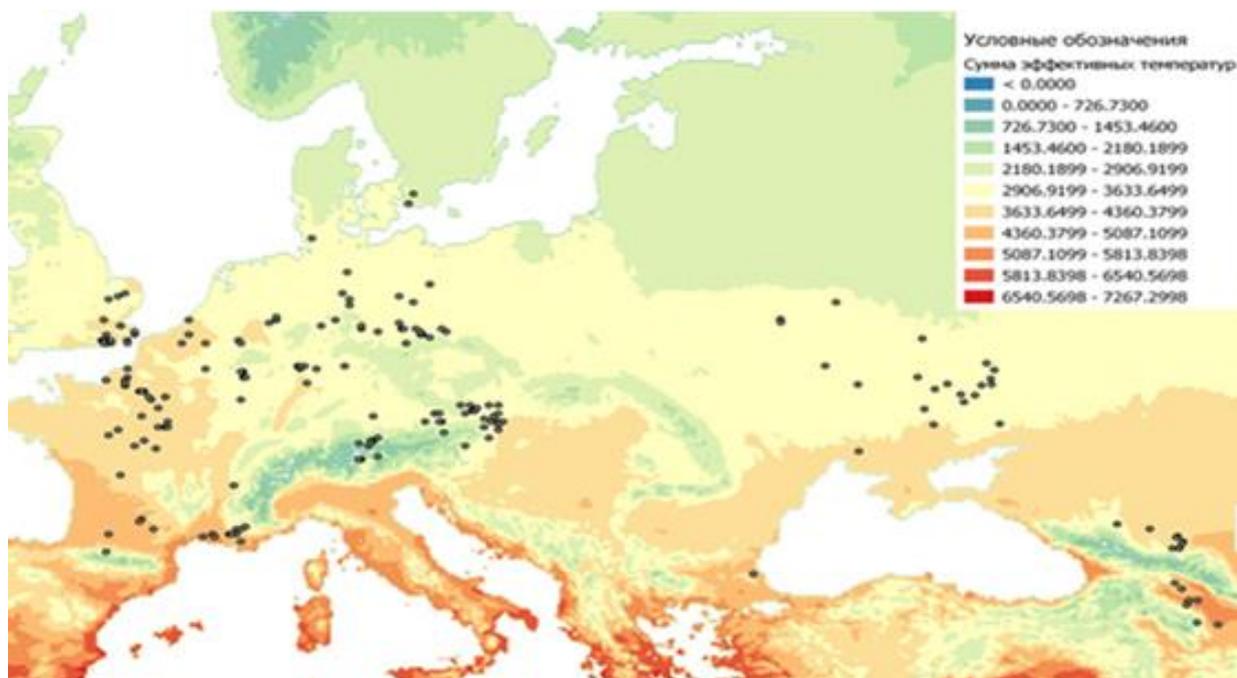


Рис. 4. Зависимость пространственного распределения хлебной жужелицы от суммы активных температур

Fig. 4. The dependence of the spatial distribution of bread ground beetles on the sum of active temperatures

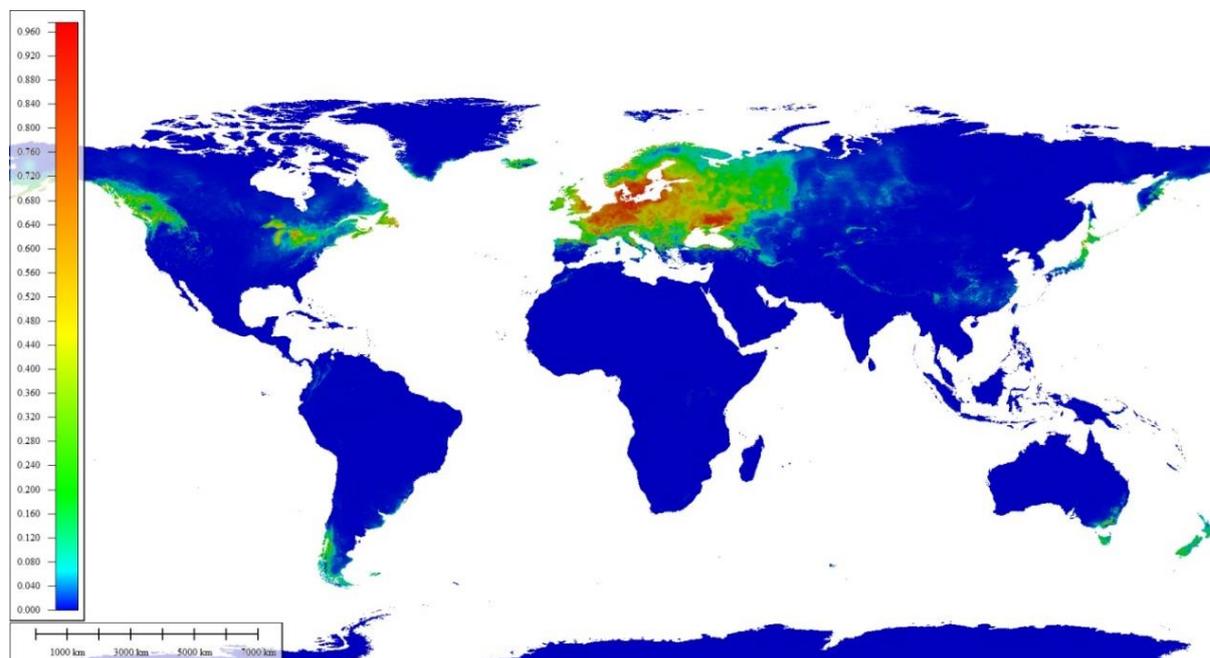


Рис. 5. Карта потенциального распространения *P. oblongopunctatus*.

Цветовая шкала диапазона комфортности обитания:

красный и оранжевый — наиболее благоприятные территории обитания (0.96–0.64);

жёлтый и зелёный — благоприятные территории (0.60–0.16);

голубой — менее благоприятные (0.16–0.04); синий — неблагоприятные (0.3–0)

Fig. 5. Map of the potential distribution of *P. oblongopunctatus*.

Color scale of the range of habitability: red and orange — the most favorable habitat areas (0.96–0.64); yellow and green — favorable territories (0.60–0.16);

dusty blue — less favorable (0.16–0.04); dark blue — unfavorable (0.3–0)

Границы современного ареала *Zabrus tenebrioides* согласуются с данными литературных источников. Наиболее оптимальные климатические условия для вида отмечены в западной и центральной Европе, в районе восточных берегов Северной Америки, в центральной и восточной части Южной Америки, центральной Африке, в юго-восточной части Австралии, западном и южном Китае, центральной России, Белоруссии, Украине, Казахстане, Иране, Туркмении, Узбекистане (70–90 %) (рис. 5).

Наибольшее влияние на современное распространение *Pterostichus oblongopunctatus* оказывают средняя годовая температура, средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, средняя температура наиболее сухого квартала, средняя температура самой тёплой четверти года и сумма осадков в самом сухом месяце года.

Важным показателем надежности модели является Area Under the Curve (AUC), который составил 0,975. Полученная нами модель распространения *P. oblongopunctatus* соответствует современным представлениям о границах ареала данного вида.

По данным точечного слоя построены полигоны, отражающие диапазон значений наиболее значимых факторов, влияющих на распространение данного вида. Визуализация диапазона значений фактора и точек находок позволяет выявить наиболее благоприятные для вида значения (рис. 6, 7, 8).

Для каждого фактора из таблицы атрибутов был произведен расчёт количества точек находок вида в полигонах. Так, при анализе среднегодовой температуры большинство точек местообитания расположены в пределах от 4 до 10° (390 из 510 точек). Вероятно, это оптимальная среднегодовая температура для данного вида.

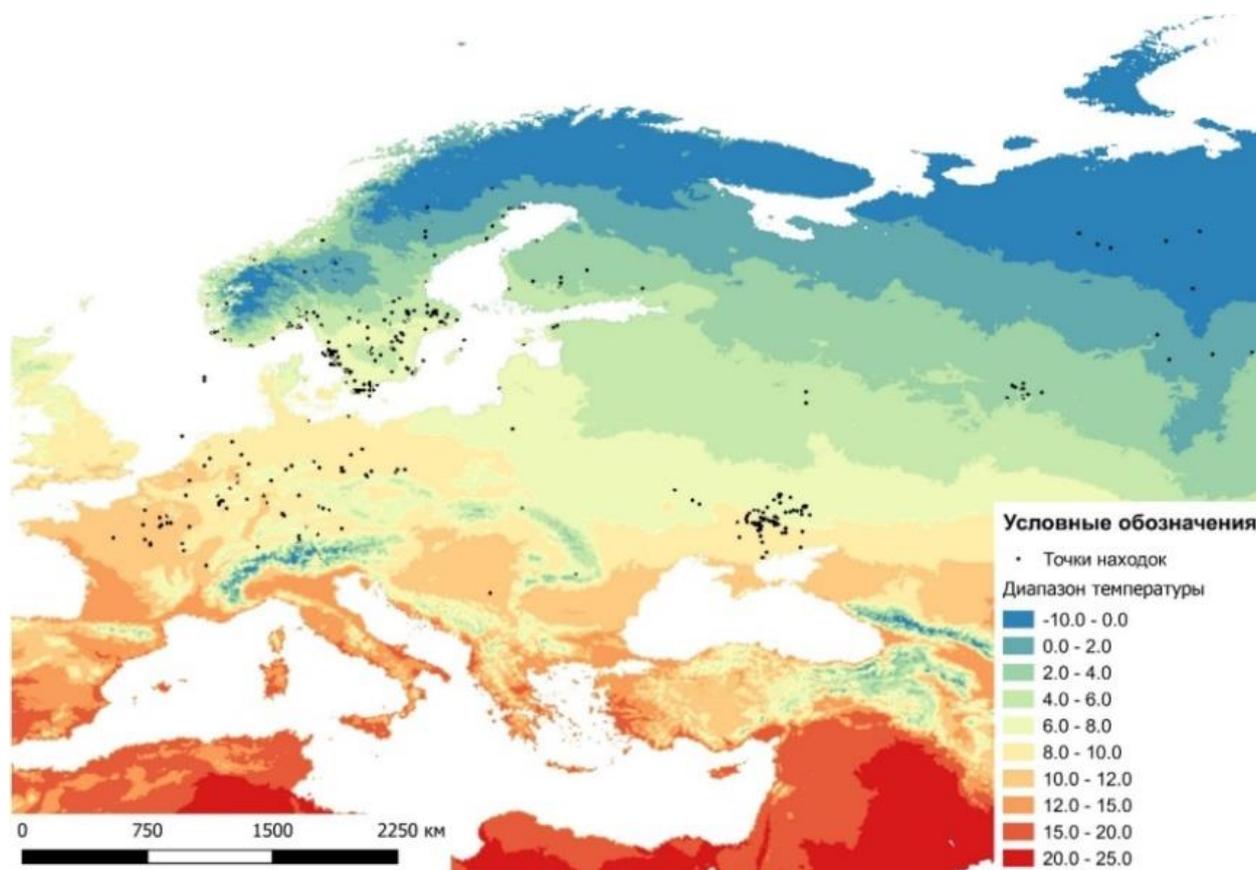
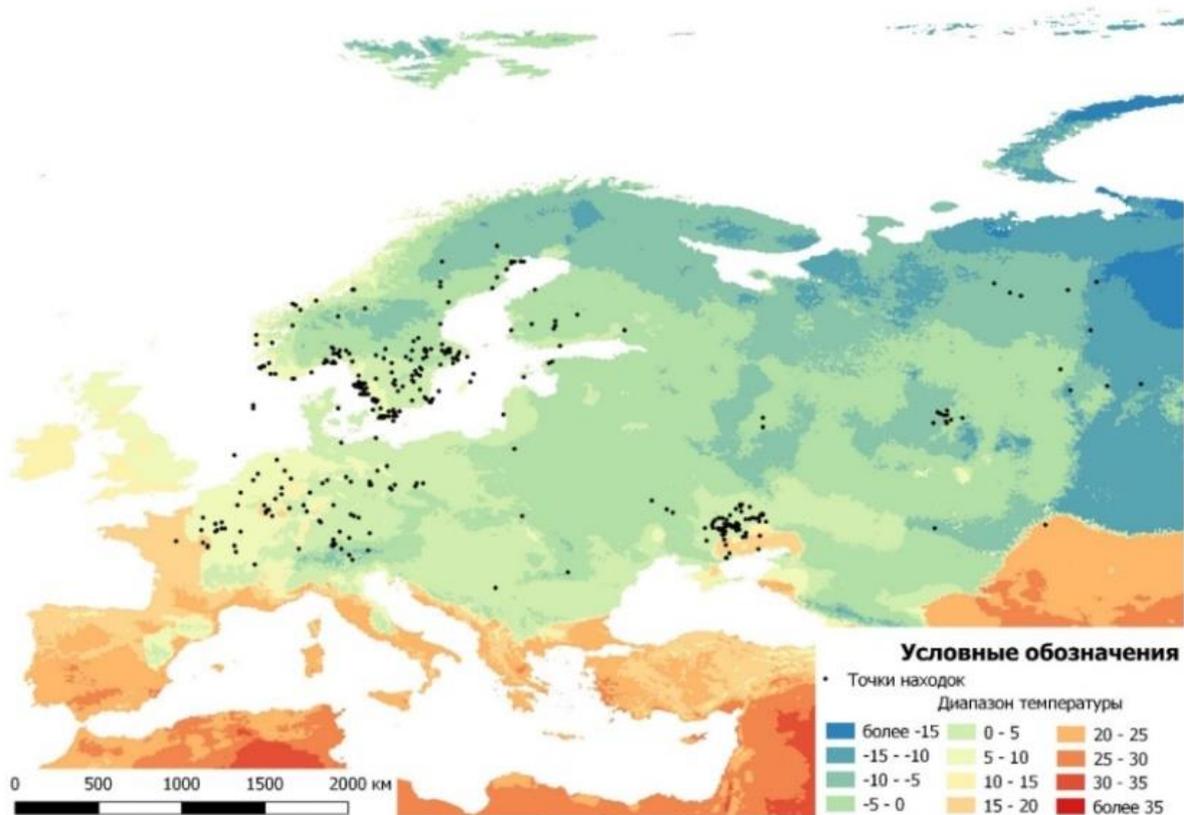
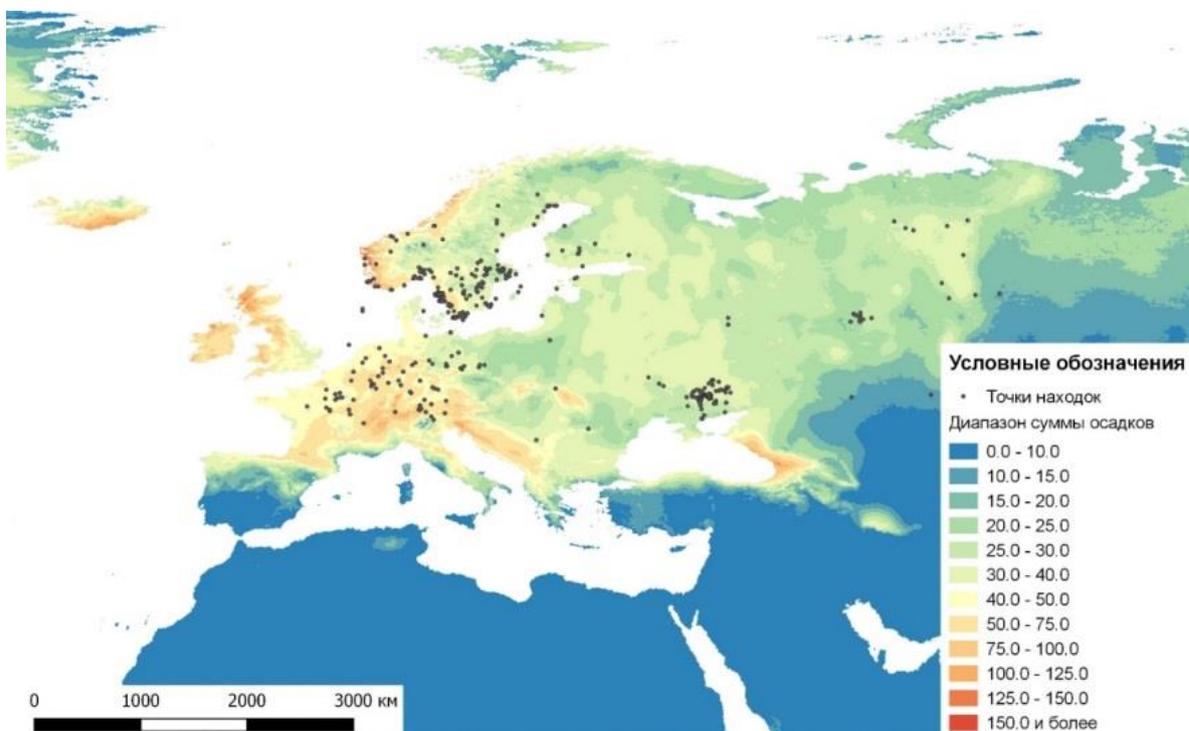


Рис. 6. Диапазоны среднегодовой температуры и точки находок  
Fig. 6. Ranges of average annual temperature and points of finds



*Рис. 7. Диапазоны температуры самого холодного квартала и точки находок*  
*Fig. 7. Temperature range of the coldest quarter and points of finds*



*Рис. 8. Диапазон суммы осадков и точки находок*  
*Fig. 8. Precipitation range and find points*

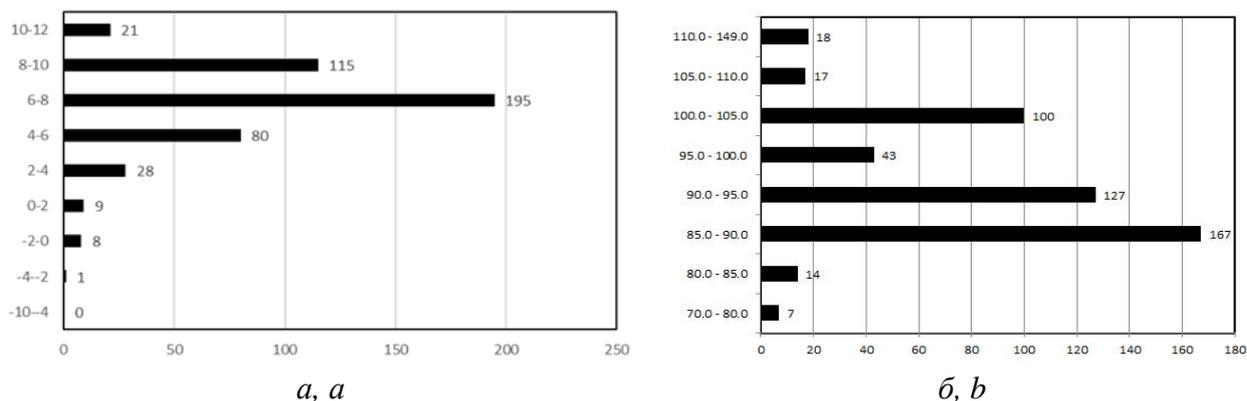


Рис. 9. Распределение количества точек нахождения *P. oblongopunctatus* (ось абсцисс) в зависимости от факторов (ось ординат, °C): а — средней годовой температуры воздуха; б — средней температуры самой тёплой четверти года  
 Fig. 9. Distribution of the number of location points of *P. oblongopunctatus* (abscissa axis) from depending on factors (ordinate axis, °C): а — the average annual air temperature; б — the average temperature of the warmest quarter of the year

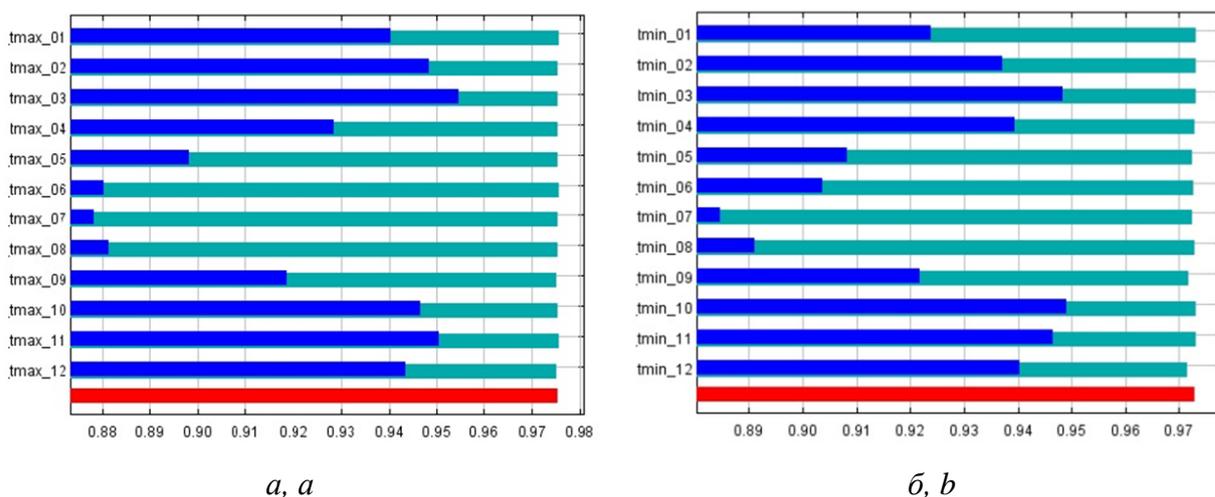


Рис. 10. Столбчатая диаграмма влияния ежемесячной средней максимальной температуры на жизненный цикл *P. oblongopunctatus*. Ось абсцисс — показатель значимости фактора; ось ординат: а — средняя максимальная температура с января по декабрь; б — средняя минимальная температура с января по декабрь  
 Fig. 10. Bar graph of the contribution of the monthly average maximum temperature to the life cycle of *P. oblongopunctatus*. Abscissa axis — indicator of the significance of the factor; ordinate axis: а — average maximum temperature from January to December; б — average minimum temperature from January to December (ordinate axis)

Наиболее благоприятная температура наиболее тёплого квартала лежит в пределах от 9 до 10,5° (437 из 510 точек). На основе полученных данных построены диаграммы (рис. 9).

Известно, что жизненный цикл жуков привязан к температурному режиму и длине светового дня. В программе MaxEnt проведена оценка вклада минимальных и максимальных среднемесячных температур на реализацию жизненного цикла *P. oblongopunctatus*. Для этого был использован приём jackknife. Результаты анализа

показаны на столбчатых диаграммах (рис. 10).

Синие столбцы показывают роль переменной при построении модели. Чем короче голубой столбец, тем больше уникальной информации содержит переменная. В данном случае наиболее значимыми являются максимальные температуры холодного периода: январь–март, сентябрь–декабрь. Аналогичная картина наблюдается и для минимальных температур. Это подтверждается тем фактом, что на развитие гонад значительное влияние оказывает длина светового дня и температура, в связи с чем наблюдается строгая приуроченность к определённым сезонным срокам. Гонады у самцов *P. oblongopunctatus* созревают в условиях короткого дня, т.е. осенью перед зимовкой и во время неё, а у самок — только после смены короткого дня на длинный, т.е. весной сразу после зимовки [Thiele, 1966; Thiele, Konen, 1975; Kreckwitz, 1980].

Получены модели прогнозных ареалов по разным сценариям на 2050 и 2070 гг. Их визуализация позволила оценить возможные изменения ареала в связи с глобальным потеплением климата.



Рис. 11. Изменение площади ареала к 2050 г. по сценарию RCP 2.6: сплошная заливка — современный ареал, заштрихованные участки — ареал 2050 г.  
 Fig. 11. Change in the area of the range by 2050 according to the RCP 2.6 scenario: solid fill — modern area, shaded areas — area of 2050

Для анализа возможных изменений ареала было создано 5 слоёв: современный ареал, ареал на 2050 г. и ареал на 2070 г. по сценарию 2.6; ареал на 2050 и 2070 гг. по сценарию 8.5. Для каждого слоя выбрали цвет и заливку так, чтобы при наложении слоёв легко можно было увидеть произошедшие изменения (рис. 11–13).

Полученные карты наглядно демонстрируют прогнозируемые изменения. Наблюдается распад сплошного ареала на части, т.е. меняется тип ареала. Современный сплошной становится дизъюнктивным. Ареал 2070 г. по сценарию 8.5 распадается на 5 частей. Распространение жужелиц относительно мало зависит от пищевого фактора. Как правило, ареалы жужелиц определяются взаимодействием исторических причин, климатических и эдафических условий, а также способностью к расселению

[Абдурахманов, Магомедова, 2008]. Вероятно, разрыв ареала связан с изменением климатических условий, что приводит к вымиранию вида на большей части ареала, но который сохраняется в отдельных изолированных друг от друга районах.



Рис. 12. Изменение площади ареала к 2070 г. по сценарию RCP 2.6:  
сплошная заливка — ареал на 2070 г., заштрихованные участки — ареал 2050 г.  
Fig. 12. Change in the area of the range by 2070 according to the RCP 2.6 scenario:  
solid fill — area for 2070, shaded areas — area of 2050



Рис. 13. Изменение площади ареала к 2070 г. по сценарию RCP 8.5:  
сплошная заливка — ареал 2050 г., заштрихованные участки — ареал 2070 г.  
Fig. 13. Change in the area of the range by 2070 according to the RCP 8.5 scenario:  
solid fill — area of 2050, shaded areas — area of 2070

## ВЫВОДЫ

Несмотря на широкое использование в научной практике методов моделирования, данное направление пока недостаточно представлено в энтомологических исследованиях. Развитие этих исследований позволит понять закономерности пространственного распределения видов-вредителей сельского хозяйства, редких и нуждающихся в охране реликтовых видов, оценить динамику их распространения в связи с изменениями климата и антропогенной нагрузкой. Данные исследования помогут разработать практические рекомендации по охране редких видов.

Полученная нами модель распространения *P. oblongopunctatus* соответствует современным представлениям о границах ареала данного вида. Выявленные значимые биоклиматические факторы подтверждаются ранее установленными данными. Выявленная динамика изменений ареала в связи с изменением климата позволяет заключить о его распаде на составные части, что приведёт к вымиранию вида на большей части ареала и сохранении его в отдельных изолированных друг от друга районах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 16-37-60068.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 16-37-60068.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахманов Г.М., Магомедова М.З. Особенности географического распространения эндемичных видов жуужелиц рода *Carabus* на Кавказе. Юг России: экология, развитие, 2008. № 3. С. 45–52.
2. Болотов И.И., Фролов А.А. Моделирование ареала и анализ вклада факторов в климатическую нишу *Parnassius mnemosyne* L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Естественные науки, 2015. № 1. С. 56–67.
3. Дудов С.В. Моделирование распространения видов по данным рельефа и дистанционного зондирования на примере сосудистых растений Нижнего горного пояса хр. Тукурингра (Зейский заповедник, Амурская область). Журнал общей биологии, 2016. Т. 77. № 1. С. 16–28.
4. Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Латыпов Э.Р. Моделирование условий произрастания и анализ вклада факторов в формирование высокобонитетных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в программе MaxEnt (на примере Бугульминско-Бибелевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан). Лесное хозяйство, 2017. № 3. С. 104–111.
5. Санданов Д.С. Современные подходы к моделированию разнообразия и пространственному распределению видов растений: перспективы их применения в России. Вестник Томского государственного университета, 2019. № 46. С. 82–114. DOI: 10.17223/19988591/46/5.
6. Bousquet Y. Tribe Pterostichini. Catalogue of Palearctic Coleoptera. V. 1. Archostemata – Muxophaga – Adepaga. Stenstrup, Denmark: Apollo Books, 2003. P. 462–521.
7. Brygadyrenko V.V. Evaluation of ecological niches of abundant species of *Poecilus* and *Pterostichus* (Coleoptera: Carabidae) in forests of steppe zone of Ukraine. Entomologica Fennica, 2016. No 27(2). P. 81–100.
8. Dicken P. Global shift: mapping the changing contours of the world economy. 7<sup>th</sup> edition. London: Guilford Press, 2015. 618 p.

9. Douma J.C., Witte J.-Ph.M., Aerts R., Bartholomeus R.P., Ordonez J.C., Venterink H.O., Wassen M.J., Van Bodegom P.M. Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models. *Ecography*, 2012. V. 35. P. 294–305.
10. Guisan A., Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecological Letters*, 2005. V. 8. P. 993–1009.
11. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000. V. 135. P. 147–186.
12. Hurka K. Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin, Czech Republic: Kabourek, 1996. 565 p.
13. Huyong Y., Lei F., Yufei Z., Li F., Di W., Chaoping Z. Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. *Global Ecology and Conservation*. Elsevier BV, March 2020, e00856. V. 21. 15 p. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00856.
14. von Kreckwitz H. Sind Nahrungsmenge und Korpergewicht von Bedeutung fur die Gonadenreifung des Carabiden *Pterostichus nigrita* Payk. in verschiedenen Photoperioden? *Zoologischer Anzeiger*. Jena, Germany: Elsevier, 1980. Bd. 204. H. 3/4. P. 157–164.
15. Kryzhanovskij O.L., Belousov I.A., Kabak I.I., Kataev B.M., Makarov K.V., Shilenkov V.G. A checklist of the ground-beetles of Russia and adjacent lands (Insecta, Coleoptera, Carabidae). Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 1995.
16. Phillips S.J., Dudic M. Modelling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008. V. 31. P. 161–175.
17. Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience*, 2014. V. 7. P. 181–184. DOI: 10.1038/NNGEO2071.
18. Portilla Cabrera C.V., Selvaraj J.J. Geographic shifts in the bioclimatic suitability for *Aedes aegypti* under climate change scenarios in Colombia. *Heliyon*, January 2020. V. 6. Iss. 1. P. e03203. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03101.
19. Qin A., Liu B., Guo Q., Bussmann R.W., Ma F., Jian Z., Xu G., Pei Sh. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, April 2017. Amsterdam: Elsevier. V. 10. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.gecco.2017.02.004.
20. Thiele H.-U., Einflüsse der Photoperiode auf die Diapause von Carabiden. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 1966. Bd. 58. P. 143–149.
21. Thiele H.-U., Konen H. Interaction between photoperiodism and temperature with respect to the control of dormancy in the adult stage of *Pterostichus oblongopunctatus* F. (Coleoptera, Carabidae). II. The development of the reproductionpotential during the winter months in the field. *Oecologia* (Berlin), 1975. V. 19. P. 339–343.
22. Tufte E.R. Beautiful evidence. Cheshire, CT: Graphics Press, 2006. 213 p.
23. Yang X.Q., Kushwaha S.P.S., Saran S., Xu J., Roy P.S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013. No 51. P. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.004>.
24. Yuanjun Z., Wei W., Hao L., Baizhu W., Xiaohui Y., Yanshu L. Modelling the potential distribution and shifts of three varieties of *Stipa tianschanica* in the eastern Eurasian Steppe under multiple climate change scenarios. *Global Ecology and Conservation*, October 2018. Elsevier. V. 16. e00501. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00501.
25. Zhang L., Jing Z., Li Z., Liu Y., Fang S. Predictive modeling of suitable habitats for *Cinnamomum Camphora* (L.) Presl using maxent model under climate change in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 31 Aug 2019. V. 16. Iss. 17. P. 3185. DOI: 10.3390/ijerph16173185.

## REFERENCES

1. *Abdurahmanov G.M., Magomedova M.Z.* Features of the geographical distribution of endemic species of ground beetles of the genus *Carabus* in the Caucasus. South of Russia: ecology, development, 2008. No 3. P. 45–52 (in Russian).
2. *Bolotov I.I., Frolov A.A.* Range modeling and analysis of the contribution of factors to the climate niche of *Parnassius mnemosyne* L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Natural Sciences, 2015. No 1. P. 56–67 (in Russian).
3. *Bousquet Y.* Tribe Pterostichini. Catalogue of Palearctic Coleoptera. V. 1. Archostemata – Myxophaga – Adephaga. Stenstrup, Denmark: Apollo Books, 2003. P. 462–521.
4. *Brygadyrenko V.V.* Evaluation of ecological niches of abundant species of *Poecilus* and *Pterostichus* (Coleoptera: Carabidae) in forests of steppe zone of Ukraine. Entomologica Fennica, 2016. No 27(2). P. 81–100.
5. *Dicken P.* Global shift: mapping the changing contours of the world economy. 7<sup>th</sup> edition. London: Guilford Press, 2015. 618 p.
6. *Douma J.C., Witte J.-Ph.M., Aerts R., Bartholomeus R.P., Ordonez J.C., Venterink H.O., Wassen M.J., Van Bodegom P.M.* Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models. Ecography, 2012. V. 35. P. 294–305.
7. *Dudov S.V.* Modeling of species distribution based on terrain and remote sensing data on the example of vascular plants of the Lower mountain zone of the Tukuringra ridge (Zeysky reserve, Amur region). Zhurnal obshchej biologii (Journal of General Biology), 2016. No 1. V. 77. P. 16–28 (in Russian).
8. *Guisan A., Thuiller W.* Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecological Letters, 2005. V. 8. P. 993–1009.
9. *Guisan A., Zimmermann N.E.* Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 2000. V. 135. P. 147–186.
10. *Hurka K.* Carabidae of the Czech and Slovak Republics. Zlin, Czech Republic: Kabourek, 1996. 565 p.
11. *Huyong Y., Lei F., Yufei Z., Li F., Di W., Chaoping Z.* Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. Global Ecology and Conservation. Elsevier BV, March 2020, e00856. V. 21. 15 p. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00856.
12. *von Kreckwitz H.* Sind Nahrungsmenge und Korpergewicht von Bedeutung fur die Gonadenreifung des Carabiden *Pterostichus nigrita* Payk. in verschiedenen Photoperioden? Zoologischer Anzeiger. Jena, Germany: Elsevier, 1980. Bd. 204. H. 3/4. P. 157–164 (in German).
13. *Kryzhanovskij O.L., Belousov I.A., Kabak I.I., Kataev B.M., Makarov K.V., Shilenkov V.G.* A checklist of the ground-beetles of Russia and adjacent lands (Insecta, Coleoptera, Carabidae). Sofia, Bulgaria: Pensoft Publishers, 1995.
14. *Phillips S.J., Dudic M.* Modelling of species distribution with Maxent: new extentions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008. V. 31. P. 161–175.
15. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. Nature Geoscience, 2014. V. 7. P. 181–184. DOI: 10.1038/NGEO2071.
16. *Portilla Cabrera C.V., Selvaraj J.J.* Geographic shifts in the bioclimatic suitability for *Aedes aegypti* under climate change scenarios in Colombia. Heliyon, January 2020. V. 6. Iss. 1. P. e03203. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03101.
17. *Qin A., Liu B., Guo Q., Bussmann R.W., Ma F., Jian Z., Xu G., Pei Sh.* Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. Global Ecology and

- Conservation, April 2017. Amsterdam: Elsevier. V. 10. P. 139–146. DOI: 10.1016/j.gecco.2017.02.004.
18. *Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Latypov E.R.* Modeling of growth conditions and analysis of the contribution of factors to the formation of high-priority stands of common pine (*Pinus sylvestris* L.) in the MaxEnt program (on the example of the Bugulminsko-Bebeleyevskaya upland within the Republic of Bashkortostan). *Forestry*, 2017. No 3. P. 104–111 (in Russian).
19. *Sandanov D.S.* Modern approaches to modeling the diversity and spatial distribution of plant species: prospects for their use in Russia. *Tomsk State University Journal*, 2019. No 46. P. 82–114. DOI: 10.17223/19988591/46/5 (in Russian).
20. *Thiele H.-U.*, Einflüsse der Photoperiode auf die Diapause von Carabiden. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 1966. Bd. 58. P. 143–149 (in German).
21. *Thiele H.-U., Konen H.* Interaction between photoperiodism and temperature with respect to the control of dormancy in the adult stage of *Pterostichus oblongopunctatus* F. (Coleoptera, Carabidae). II. The development of the reproduction potential during the winter months in the field. *Oecologia (Berlin)*, 1975. V. 19. P. 339–343.
22. *Tufte E.R.* Beautiful evidence. Cheshire, CT: Graphics Press, 2006. 213 p.
23. *Yang X.Q., Kushwaha S.P.S., Saran S., Xu J., Roy P.S.* Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013. No 51. P. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.004>.
24. *Yuanjun Z., Wei W., Hao L., Baizhu W., Xiaohui Y., Yanshu L.* Modelling the potential distribution and shifts of three varieties of *Stipa tianschanica* in the eastern Eurasian Steppe under multiple climate change scenarios. *Global Ecology and Conservation*, October 2018. Elsevier. V. 16. e00501. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00501.
25. *Zhang L., Jing Z., Li Z., Liu Y., Fang S.* Predictive modeling of suitable habitats for *Cinnamomum Camphora* (L.) Presl using maxent model under climate change in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 31 Aug 2019. V. 16. Iss. 17. P. 3185. DOI: 10.3390/ijerph16173185.
-