



УДК 574.9:004.94:598.115 (477.52/.6)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВИДОВОГО АРЕАЛА В ПРОГРАММЕ MAXENT (НА ПРИМЕРЕ УЗОРЧАТОГО ПОЛОЗА И СТЕПНОЙ ГАДЮКИ)

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT APPROACHES TO THE MODELING OF THE SPECIES' AREAL IN THE MAXENT PROGRAMME (BY EXAMPLE OF DIONE SNAKE AND STEPPE VIPER)

А.И. Тупиков¹, П.А. Украинский²
A.I. Tupikov¹, P.A. Ukrainskiy²

¹ Национальный природный парк «Двуречанский», Украина, 62701, пос. Двуречное, ул. Привокзальная, 51

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

¹ National nature park "Dvurechanskyi", 51, Privokzal'naya St, Dvurechnoe village, 62701, Ukraine

² Belgorod State National Research University, 85, Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia
E-mail: a.i.tupikov@gmail.com, pa.ukrainski@gmail.com

Аннотация. На примере узорчатого полоза и степной гадюки рассмотрен вопрос об эффективности различных подходов к моделированию видового ареала в программе MaxEnt. Эта программа позволяет создавать расчетные карты вероятности обнаружения вида на основе сопоставления факторов среды с известными местами обитания вида. Цель работы - сравнительный анализ эффективности региональных моделей пространственного распространения вида, построенных на основе биоклиматических данных низкого пространственного разрешения (основной и расширенный набор базы WorldClim) и космических снимков высокого разрешения Landsat. Региональный охват отличает представленную работу от большинства аналогичных, выполненных на субконтинентальном, зональном уровне или для отдельных стран. Для узорчатого полоза моделирование произведено в пределах Донецкой области, а для степной гадюки - Харьковской области. Все модели созданы с одинаковыми программными настройками, чтобы обеспечить корректность сравнения. Модели на основе данных базы WorldClim показали низкую эффективность из-за недостаточно высокого пространственного разрешения. Улучшить их можно создав региональные аналоги базы WorldClim с высоким пространственным разрешением. Модели на основе снимков Landsat показали высокую эффективность, но только при условии точного определения координат мест находок вида.

Resumé. We have studied the effectiveness of different approaches in specific habitat modeling in MaxEnt programme with reference to the Dione snake and the Steppe viper. This programme allows us to create calculated maps of detection probability of the species on the basis of comparison of the environmental factors and the known habitats. The aim of the work is a comparative analysis of the effectiveness of regional models of the species' spatial distribution, made on the basis of bioclimatic data of low spatial resolution (basic and extended sets of WorldClim base) and Landsat space images of high resolution. The regional coverage distinguishes this work from the most of similar ones, made on the subcontinental zonal level or for the different countries. For the Dione snake the modeling was made within the Donetsk region and for the Steppe viper - within the Kharkov region. All these models were made with the same software features with the purpose of correct comparison. The models on the basis of WorldClim data showed the low effectiveness because of the lack of spatial resolution. They can be improved by the way of creation of regional analogues of the WorldClim base with the high spatial resolution. The models on the basis of Landsat space images showed the high effectiveness but only provided exact coordinates determination of the species' findings.

Ключевые слова: математическое моделирование, MaxEnt, распространение, Bioclim, Landsat.

Key words: mathematical modeling, MaxEnt, distribution, Bioclim, Landsat.

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач биогеографии является моделирование пространственного распространения видов. Ее решение связано с нахождением зависимости между наличием на изучаемой территории конкретного вида и существующей комбинацией факторов среды. Зная эту зависимость, можно оценить вероятность нахождения изучаемого вида в различных точках и на этой основе построить расчетную карту видового ареала [Soberon, Peterson, 2005; Phillips, Anderson, Schapire, 2006; Титар, 2011]. Для реализации такого подхода разработано большое число

алгоритмов моделирования. Среди них наибольшее распространение получил метод максимальной энтропии, реализованный в программе MaxEnt [Soberon, Peterson, 2005; Phillips, Dudik, 2008; Титар, 2011].

Чаще всего моделирование пространственного распространения вида выполняется на основе набора данных низкого пространственного разрешения, которые характеризуют абиотические факторы (различные параметры температуры, влажности, количества осадков, рельеф местности и пр.) [Желтухин и др., 2007; Пузаченко и др., 2008; Ананьева, Голынский, 2013; Кукушкин, 2013; Смирнов, 2013а, б; Болотов, Фролов, 2015].

Наибольшей популярностью у современных исследователей пользуется набор глобальных биоклиматических данных WorldClim, представляющий собой ряд тематических растров с разрешением 1000 м/пиксель [Hijmans et al., 2015]. Использование набора абиотических данных WorldClim лежит основе в большого количества работ [Phillips et al., 2006; Желтухин и др., 2007; Пузаченко и др., 2008; Дирипаско и др., 2008; Титар, 2011; Ананьева, Голынский, 2013; Кукушкин, 2013; Смирнов, 2013а, б; Олонова, Гао, 2014; Болотов, Фролов, 2015]. Тем не менее, одних абиотических характеристик недостаточно для полноценного моделирования видового ареала. Так ряд исследователей настаивает на том, что необходимо включение в модели биотических [Уиттекер, 1980; Хански, 2010] и антропогенных факторов [Шалыт, Калмыкова, 1935; Малышева, Малаховский, 2000; Тимошенко, Тимошенко, 2007; Fischer, Lindenmayer, 2007; Хански, 2010; Reading et al., 2010; Pauli et al., 2010]. Для многих видов ключевым биотическим фактором является состояние растительного покрова, а наиболее значимым антропогенным фактором – степень его преобразования (угнетения) человеком. До настоящего времени при моделировании видовых ареалов эти факторы не учитывались из-за отсутствия детальных данных достаточно большого пространственного охвата. Источником таких данных, характеризующих состояние растительного покрова, могут выступать космические снимки.

Целью представленной работы является сравнительный анализ эффективности региональных моделей пространственного распространения вида, построенных на основе различных наборов данных. Это включает в себя поиск ответов на следующие вопросы:

- 1) Достаточно ли для моделирования пространственного распространения вида на региональном уровне одних только биоклиматических данных низкого пространственного разрешения из базы WorldClim?
- 2) Эффективны ли модели, сочетающие биоклиматические данные и космические снимки?
- 3) Накладывает ли применение космических снимков дополнительные требования к точности данных о местах находок видов?

Объекты и методы исследования

Моделирование ареала выполнено для двух видов степных змей – степной гадюки (*Vipera renardi*) и узорчатого полоза (*Elaphe dione*). Оба вида занесены в Красную книгу Украины [Акимов, 2009]. Для сохранения этих видов необходимо в деталях изучить современную картину их распространения. Это нужно для разработки эффективных мер охраны, в т. ч. для обоснования расширения существующих и проектирования новых особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

В качестве исследуемой территории для узорчатого полоза выбрана Донецкая область, а для степной гадюки – Харьковская область. Моделирование выполнено методом максимальной энтропии, реализованным в программе MaxEnt. Для каждого вида построено четыре модели:

- 1) традиционная биоклиматическая модель (далее модель Bioclim);
- 2) расширенная биоклиматическая модель (далее модель Bioclim+);
- 3) модель на основе космических снимков весенней съемки (далее модель Landsat (spring));
- 4) модель на основе космических снимков осенней съемки (далее модель Landsat (autumn)).



Каждая из моделей выполнена в двух вариантах – стандартном и с исключением из анализа территории населенных пунктов (далее settlement-вариант или прибавление к названию модели слова settlement). Исходными данными для создания моделей являются сведения о местах находок видов, набор биоклиматических данных, космические снимки со спутника Landsat 8, данные о границах населенных пунктов. Конечным результатом моделирования являются растры вероятности нахождения модельного вида, которые используются для создания карт ареалов потенциального обитания.

Все данные, кроме сведений о распространении видов, получены из открытых источников в сети Интернет и являются данными, свободно распространяемыми на некоммерческой основе. Сведения о местах находок *E. dione* и *V. renardi* получены на основе собственных полевых исследований 2014–2015 гг. Координаты зафиксированы с помощью GPS-навигатора и записаны в csv-файл в виде десятичных градусов (один из форматов исходных данных, поддерживаемый программой MaxEnt).

Также, в дополнение к собственным исследованиям, были проанализированы коллекционные материалы Музея природы (г. Харьков) и Зоологического музея (ЗМ ННПМ, г. Киев).

Набор биоклиматических данных получен с сайта <http://www.worldclim.org/bioclim>. Он состоит из 19 основных и 5 дополнительных параметров. Основные параметры использованы для построения моделей Bioclim. Они включают в себя:

- 1) среднегодовую температуру,
- 2) суточные колебания температуры (среднемесячные),
- 3) изотермальность (отношение среднегодовой температуры к среднегодовой амплитуде температур умножено на 100),
- 4) сезонность температуры (коэффициент вариации),
- 5) максимальную температуру самого теплого периода,
- 6) минимальную температуру самого холодного периода,
- 7) среднегодовую амплитуду температур,
- 8) среднюю температуру самого влажного квартала,
- 9) среднюю температуру самого сухого квартала,
- 10) среднюю температуру самого теплого квартала,
- 11) среднюю температуру самого холодного квартала,
- 12) среднегодовое количество осадков,
- 13) количество осадков для самого влажного периода,
- 14) количество осадков для самого сухого периода,
- 15) сезонность осадков (коэффициент вариации),
- 16) количество осадков самого влажного квартала,
- 17) количество осадков самого сухого квартала,
- 18) количество осадков в самом теплом квартале,
- 19) количество осадков в самом холодном квартале.

Основные и дополнительные биоклиматические параметры вместе использованы для построения моделей Bioclim+. Дополнительные пять параметров включают ежемесячные минимальные, средние и максимальные показатели температур, ежемесячный уровень осадков, а также абсолютную высоту местности.

Космические снимки, использованные для построения моделей Landsat (spring) и Landsat (autumn) получены из интернет-архива данных дистанционного зондирования Американской геологической службы (USGS) – <http://www.glovis.usgs.gov>. Для работы взяты многозональные космические снимки Landsat 8 OLI с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Для моделирования использовались три канала сенсора OLI из семи: третий (зеленая часть спектра), четвертый (красная часть спектра) и пятый (ближняя инфракрасная часть спектра) канал. Эта комбинация каналов позволяет определять тип и состояние растительного покрова, а также отделять его от других объектов (горных пород, обнаженной почвы, водоемов и искусственных поверхностей). Таким способом создается основа для оценки степени преобразованности территории человеком. Поскольку характеристики растительного покрова меняются в течение года, было решено построить две модели на основе космических снимков – для весеннего и осеннего сезона.



Поскольку размер модельных территорий превосходит размер одной сцены Landsat, то использовалось несколько снимков, сшитых в мозаику. Для модели Landsat (spring) на Харьковскую область такая мозаика состояла из снимков следующих дат съемки (в скобках номер сцены (path/row) согласно стандартной нумерации миссии Landsat): 06.06.2015 (178/025), 06.06.2015 (178/026), 13.06.2015 (177/025), 13.06.2015 (177/026). Для модели Landsat (autumn) на Харьковскую область использована мозаика из следующих снимков: 07.10.2014 (178/025), 07.10.2014 (178/026), 14.09.2014 (177/025), 14.09.2014 (177/026), 09.10.2014 (176/025), 09.10.2014 (176/026). Весенняя мозаика космических снимков для модели Landsat (spring) на Донецкую область создана из четырех снимков: 25.06.2013 (175/027), 19.06.2014 (176/026), 19.06.2015 (176/027). Осенняя мозаика космических снимков для модели Landsat (autumn) также создана из четырех снимков 31.08.2014 (175/027), 07.09.2014 (176/026), 07.09.2014 (176/027).

Векторный слой с границами населенных пунктов взят из ресурса OpenStreetMap – международного общественного картографического проекта (<http://www.openstreetmap.org>). Этот слой использован для создания *settlement*-вариантов для каждой из четырех моделей. Особенностью этого варианта модели является то, что из растра вероятности нахождения модельного вида вырезаются территории населенных пунктов как зоны с крайне неблагоприятными условиями для обитания. Т. е. производится моделирование антропогенной фрагментации ареала.

При построении всех моделей применены стандартные программные настройки, с включенной оценкой важности вклада каждой переменной (метод «складного ножа» Jackknife). Для увеличения точности моделей и их статистической оценки использован инструмент «random test percentage» (метод случайных тестовых данных) с параметром 25%. Этот инструмент случайным образом исключает 25% находок из общего числа (тестовые данные) и использует их в дальнейшем для проверки результата моделирования. Остальные 75% находок являются обучающими данными, и на их основе строится модель. Для характеристики качества модели производится расчет точности описания обучающих данных предсказательной способности. Оба показателя выражаются в долях от единицы. Первая характеристика (Training data) показывает, насколько хорошо полученная модель описывает вводимые данные. А вторая характеристика (Test data) показывает, насколько результат моделирования совпадает с тестовыми данными. Качественной считается модель, у которой оба этих показателя не ниже 0.5 [Phillips, 2015].

Результаты и их обсуждение

Для обоих видов змей моделирование на основе биоклиматических параметров (как с использованием стандартного набора, так и с включением расширенных характеристик) имело схожий уровень эффективности. Обе модели (Bioclim и Bioclim+) распространения узорчатого полоза (рис. 1) в Донецкой области соответствуют современным представлениям о местах обитания вида в этом регионе. Так участки, в которых вероятность обнаружения вида выше 50%, расположены в основном к северу и северо-востоку от Донецкого края.

Стоит отметить, что не все фактические находки модель смогла удачно описать. Две находки узорчатого полоза оказались расположены за пределами зоны, где вероятность встречи вида выше 50% (см. рис. 1). Вероятно, это связано с высокой экологической пластичностью вида, который может занимать самые разнообразные биотопы [Банников и др., 1977; Рева и др., 1989; Ананьева и др., 1998;]. Но нельзя исключить того, что находки за пределами смоделированной зоны оптимума указывают на недостаточную информативность использованных биоклиматических параметров. Отсюда могли возникнуть ошибки моделирования. К подобным фактам необходимо относиться весьма серьезно, ведь моделирование на основе биоклиматических данных является самым распространенным способом моделирования ареалов среди биологов. И в свете подобных фактов эти широко распространенные подходы необходимо скорректировать.

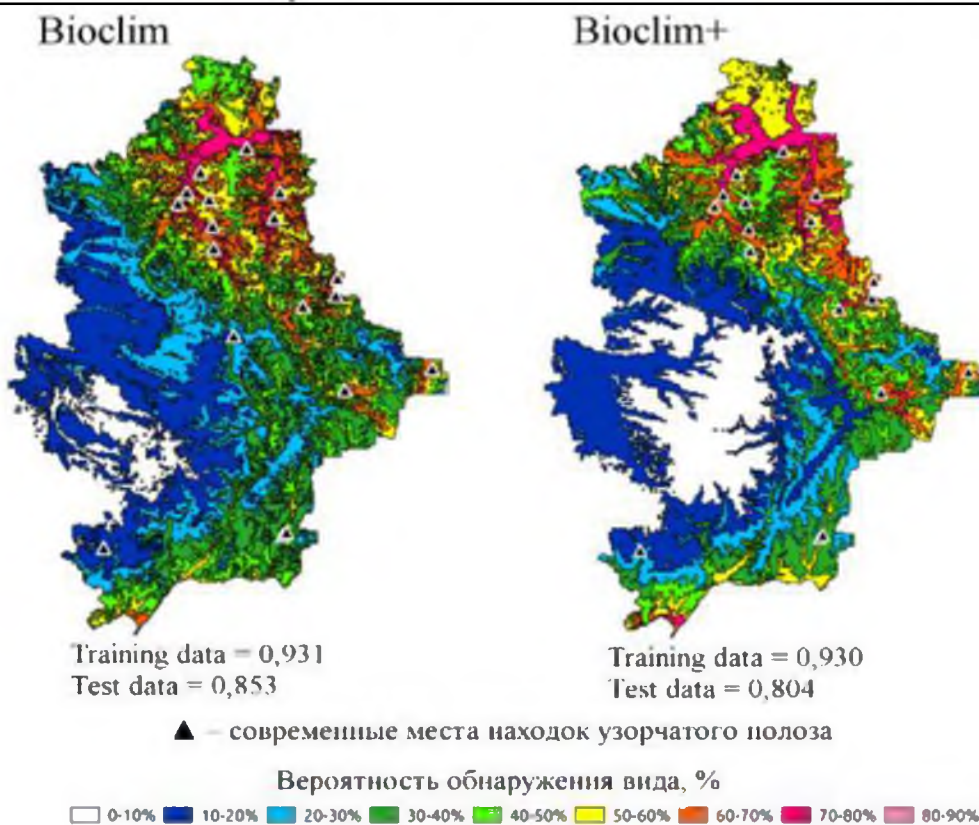


Рис. 1. Расчетная карта распространения узорчатого полоза в Донецкой области, полученный на основании биоклиматических параметров среды
Fig. 1. Predict map of the distribution of Dione snake in the Donetsk region made on the basis of bioclimatic medium parameters

Для степной гадюки модели Bioclim и Bioclim+ дали похожее распределение вероятности обнаружения вида на территории Харьковской области (рис. 2). При этом в полученных картах вероятности обнаружения выделяются два аномальных участка с низкой вероятностью (на севере и на юге области). Наличие северного участка противоречит существующим представлениям о реальной картине распространения вида [Тупиков, Зиненко, 2015а]. Там благоприятные условия для его обитания. В тоже время, переоцененной представляется вероятность обнаружения степной гадюки в западной части области, для которой есть только одна современная находка вида.

Анализ литературных источников показывает, что еще в начале XX в. гадюка встречалась практически по всей территории области, а сокращение мест ее обитаний началось в 70-х гг. прошлого века [Тупиков, Зиненко, 2015б]. Для получения сравнительной картины распространения степной гадюки в прошлом и настоящем, была создана еще одна Bioclim-модель. В нее включены исторически-известные до 1990-х гг. находки. Как видно на рисунке 3, включение в процесс моделирования этих находок существенно изменило полученную карту вероятности обнаружения вида. Значительная часть северо-западных, западных и южных частей области была исключена из числа пригодных для обитания территорий. Модель показанная на рисунке 3 значительно правдоподобнее моделей, показанный на рисунке 2. Тем не менее, и она нуждается в дальнейшем улучшении. Ведь современные данные о находках [Тупиков, Зиненко, 2015б] этого вида свидетельствуют, что в западной части располагается одна из достаточно стабильных и многочисленных популяций этого вида (Тупиков, собственное наблюдение).

Для степной гадюки эффективность моделей, построенных на основе биоклиматических данных (Bioclim и Bioclim+) оказалась низкой (Test data = 0.552). Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, качество моделей снизил недостаточно большой объем входных данных. При малом количества точек находок вида существует риск, что выборка окажется нерепрезентативной. Это может привести к тому, что MaxEnt в качестве основного параметра, определяющего распределение вида, выберет фактор

таковым не являющийся. Например, для исследуемых видов основным фактором определяющим распределение пригодных для жизни мест не может служить значение количества осадков в самый холодный период года или среднесуточная температура января и т. д.

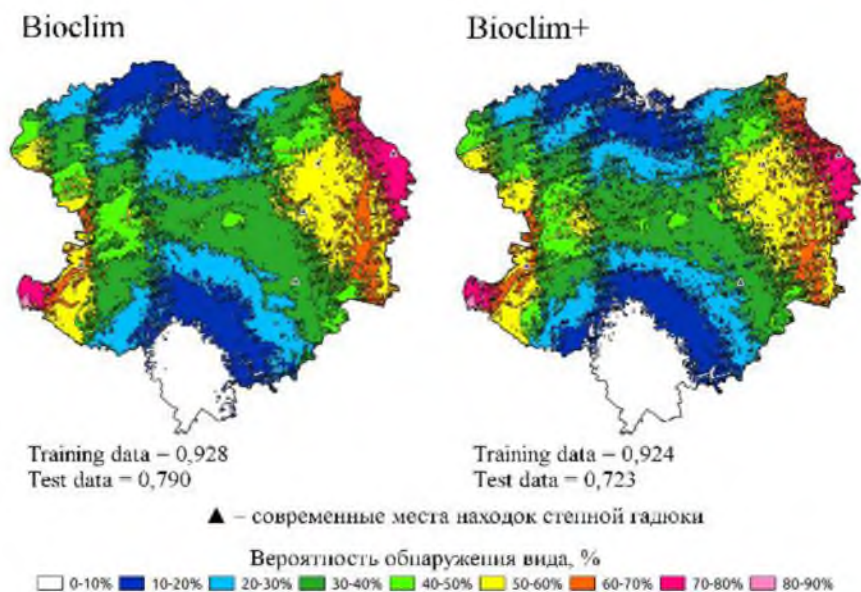


Рис. 2. Расчетная карта распространения степной гадюки в Харьковской области, полученный на основании биоклиматических параметров среды
 Fig. 2. Predict map of the distribution of Steppe Viper in the Kharkov region made on the basis of bioclimatic medium parameters

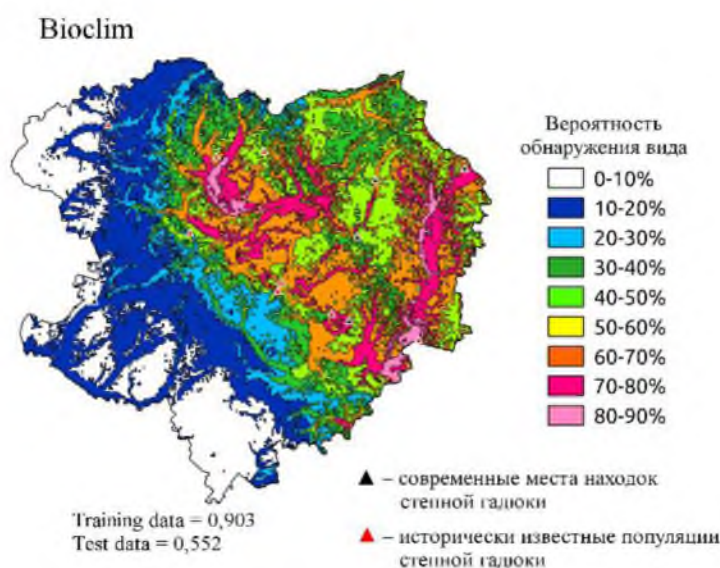


Рис. 3. Прогноз распространения степной гадюки в Харьковской области, выполненный с учетом находок известных до 1990-х гг.
 Fig. 3. Predict map of the distribution of Steppe Viper in the Kharkov region considering the findings till 1990s

Вторая причина низкой эффективности моделей на основе биоклиматических данных – недостаточное количество анализируемых параметров. 19 биоклиматических параметров не могут полноценно характеризовать условия среды обитания вида. И помимо биоклиматических характеристик, надо привлекать еще данные, характеризующие биотические и антропогенные факторы.

Модели, построенные на основе космических снимков, показали большую эффективность, чем биоклиматические модели. Это связано с тем, что космические снимки имеют более высокое пространственное разрешение, чем набор биоклиматических данных (30 м/пиксель против приблизительно 1000 м/пиксель).

Модели Landsat (spring) и Landsat (autumn) приведены на рисунках 4 и 5 (для удобства визуализации продемонстрированы модели для уменьшенных фрагментов исследуемых территорий).

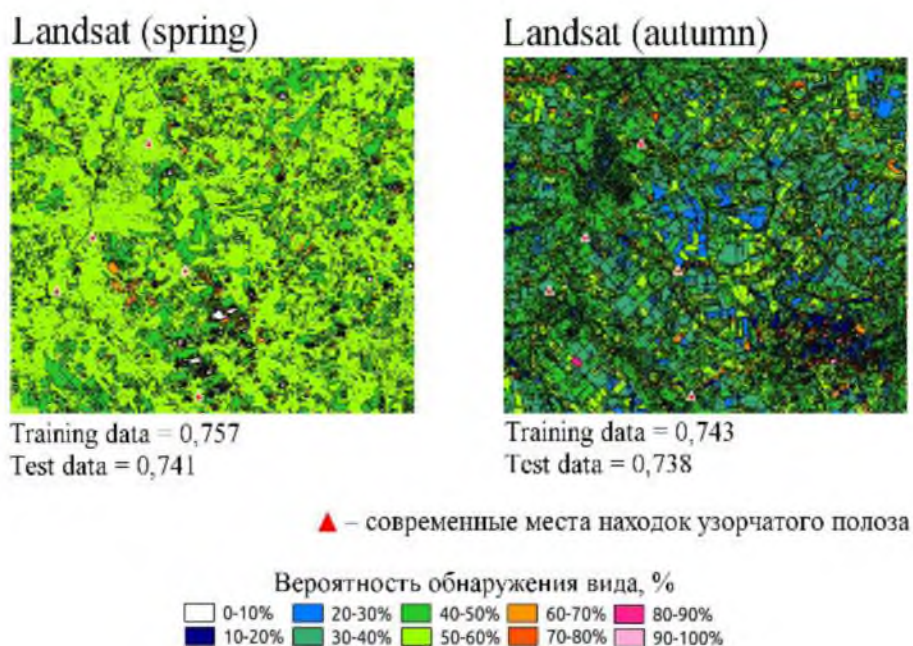


Рис. 4. Один и тот же фрагмент расчетной карты распространения узорчатого полоза в Донецкой области, полученный на основе данных многозонального снимка со спутника Landsat 8
 Fig. 4. The same fragment of the predict map of the distribution of Dione snake in the Donetsk region made on the basis of the of multispectral Landsat 8 satellite data

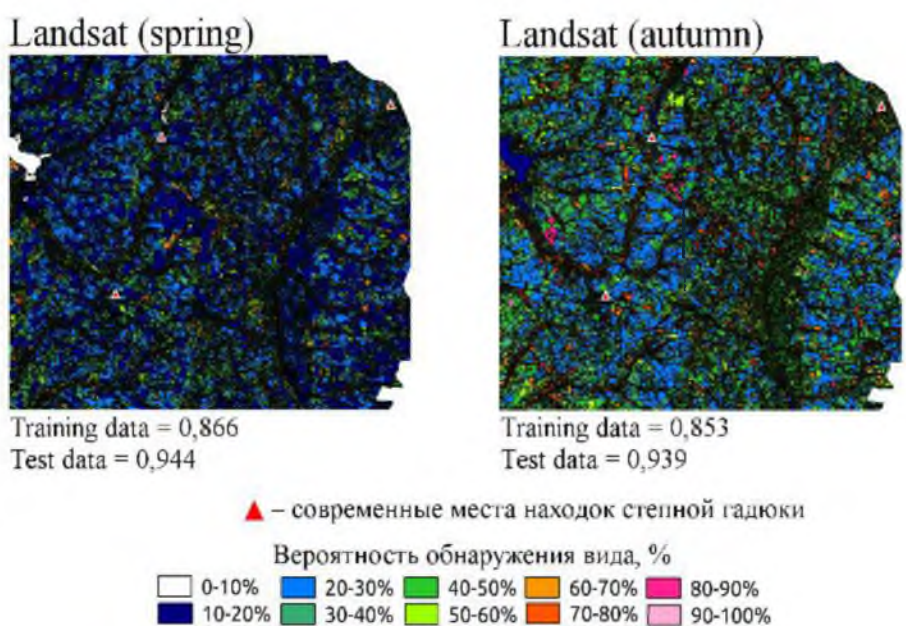


Рис. 5. Один и тот же фрагмент расчетной карты распространения степной гадюки в Харьковской области, полученный на основе данных многозонального снимка со спутника Landsat 8
 Fig. 5. The same fragment of the predict map of the distribution of Steppe Viper in the Kharkov region made on the basis of the multispectral Landsat 8 satellite data

При повышении пространственного разрешения модели возрастает влияние на ее точность качества координатной привязки мест находок вида. Для узорчатого полоза (рис. 4), координаты девяти местонахождений вида определены приблизительно, опираясь на литературные описания и подтверждающие сведения коллег. Соответственно, существует вероятность, что при моделировании из-за погрешности координат в модель ошибочно

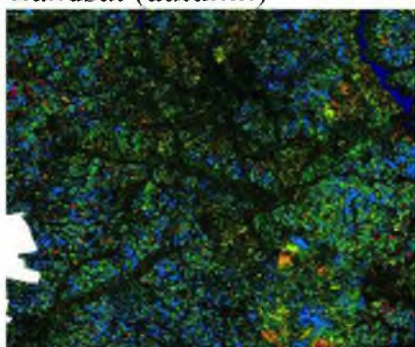
могли быть включены субоптимальные для существования вида территории. На исследуемой территории это преимущественно пашни и залежи, граничащие с овражно-балочной сетью. Результат подобной ошибки иллюстрирует рисунок 4. В моделях Landsat (springs) и Landsat (autumn), представленных на нем, большая часть пахотных земель были включены в состав средневероятностных для обитания вида зон.

В отличие от узорчатого полоза, моделях Landsat (springs) и Landsat (autumn) для (см. рис. 5) достаточно правдоподобны. Они хорошо иллюстрируют пространственное размещение пригодных для жизни вида участков. Здесь большая часть обрабатываемых земель получила низкое значение вероятности встречи вида. То есть, распределение значительной части высоковероятностных для встречи вида зон связано с территориями неудобными для ведения хозяйственной деятельности человека. Такой результат является прямым свидетельством того, что сокращение пригодных мест обитания вида происходит вследствие растущей сельскохозяйственной нагрузки. Полученные таким методом результаты в дальнейшем можно использовать для изучения пространственной структуры популяции и выявления участков наиболее значимых для сохранения вида.

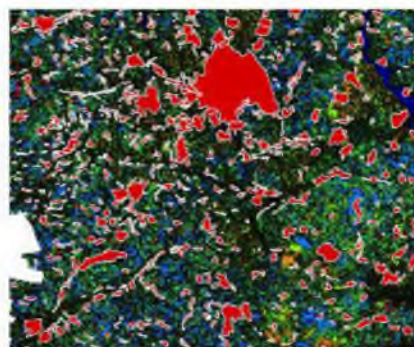
Резюмируя поведение моделей Landsat, отметим, что они показывают более правдоподобную картину распределения пригодных для обитания вида мест. Но для этого необходимо обеспечить высокую точность входных данных о местонахождении вида. Даже незначительные ошибки в установлении координат места находки могут стать причиной завышения вероятности встречи вида на участках, малопригодных для его обитания.

Несмотря на все трудности моделирования, исследование пространственного распределения видов, может стать основополагающим этапом в процессе изучения охраняемых видов и разработке стратегий их охраны. Высокая точность снимков Landsat позволяет изучать распространение видов даже в рамках небольших географических зон. Эти преимущества могут быть дополнены методами изучения и оценки факторов фрагментирующих нативные биотопы. На рисунке 6 приведен пример модели, из которой исключены основные объекты фрагментирующие биотопы – населенные пункты.

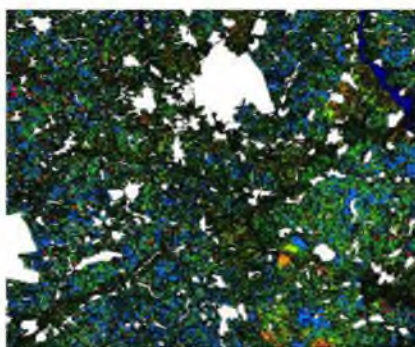
Landsat (autumn)



Фрагмент оригинальной модели



Фрагмент модели с нанесенными границами населенных пунктов



Фрагмент модели с исключенными территориями населенных пунктов

Вероятность обнаружения вида, %

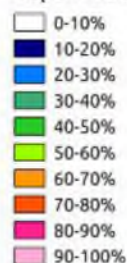


Рис. 6. Пример исключения из результатов моделирования территорий населенных пунктов

Fig. 6. Example of the exception of inhabited localities from the results of modeling

Результаты оценки изменения площадных характеристик содержатся в таблицах 1 и 2. Исключение из биоклиматических моделей территорий населенных пунктов



показало незначительное сокращение площадей мест в субоптимальных для жизни вида зонах (50–80%). Степень сокращения площади биотопов здесь не превышала 2%. Более масштабный эффект показало исключение населенных пунктов из моделей Landsat. Здесь значительное сокращение наблюдалось для всех категорий зон вероятности. При этом населенные пункты могли до 11% сократить площадь участков с субоптимальными условиями (см. табл. 1, табл. 2).

Таблица 1
Table 1

**Оценка площади и числа фрагментов в разных вариантах моделей для
Elaphe dione на территории Донецкой области
Estimation of the area and the number of fragments in the different variants of the models
for *Elaphe dione* within the Donetsk region**

Способ построения модели	Значение площади, км ² S (Min-Max)/число фрагментов в модели с разной вероятностью встречи вида				
	50–60%	60–70%	70–80%	80–90%	90–100%
¹ Bioclim	3187.05(0.56–195.84)/743	2290.34 (0.56–197.78)/453	772.23 (0.56–369.38)/206	2.29 (0.57–0.57)/4	–
Bioclim ⁵ settlement	3177.25 (0.56–195.84)/729	2274.36 (0.56–197.78)/436	767.66 (0.56–369.38)/198	2.29 (0.57–0.57)/4	–
² Bioclim+	3151.01 (0.56–618.67)/435	1950.75 (0.56–422.72)/319	1022.85 (0.56–633.33)/145	5.15 (0.57–2.29)/4	–
Bioclim+ settlement	3135.46 (0.56–618.67)/423	1942.76 (0.56–422.72)/311	1019.43 (0.56–633.33)/141	5.15 (0.57–2.29)/4	–
³ Landsat (spring)	18364.45 (9×10 ⁻³ –1720.90)/134292	892.62 (9×10 ⁻³ –3.53)/98533	24.97 (9×10 ⁻³ –0.77)/10683	7.88 (9×10 ⁻³ –0.27)/3552	2.64 (9×10 ⁻³ –0.45)/859
Landsat (spring) settlement	16408.66 (9×10 ⁻³ –137.29)/121760	800.38 (9×10 ⁻³ –3.53)/71888	20.38 (9×10 ⁻³ –0.77)/8011	7.06 (9×10 ⁻³ –0.27)/2951	2.44 (9×10 ⁻³ –0.45)/735
⁴ Landsat (autumn)	6395.16 (9×10 ⁻³ –103.4)/273276	1860.9 (9×10 ⁻³ –6.73)/126837	324.66 (9×10 ⁻³ –8.48)/29445	56.02 (9×10 ⁻³ –1.47)/5400	17.3 (9×10 ⁻³ –0.78)/975
Landsat (autumn) settlement	6064.48 (9×10 ⁻³ –111.71)/212002	1756.43 (9×10 ⁻³ –6.73)/102589	312.45 (9×10 ⁻³ –8.48)/25031	53.45 (9×10 ⁻³ –1.47)/4709	15.79 (9×10 ⁻³ –0.78)/822

Примечание: ¹Bioclim – моделирование с применением стандартного набора биоклиматических характеристик (19 параметров); ²Bioclim+ – моделирование с применением расширенного набора биоклиматических характеристик; ³Landsat (spring) – моделирование на основе данных мультиспектрального снимка Landsat 8 OLI, весенняя мозаика; ⁴Landsat (autumn) – моделирование на основе данных мультиспектрального снимка Landsat 8 OLI, осенняя мозаика; ⁵settlement – результаты различных способов с исключенными границами населенных пунктов.

Оценивая уровень сокращения площади зон с разной вероятностью пребывания вида можно отметить следующее. Конечно, населенные пункты являются не единственными участками ограничивающими распространение вида или сокращающими пригодные биотопы. Но все же, влияние даже одного такого фактора оказало существенное влияние на сокращение числа пригодных для обитания вида мест. Вместе с тем с включением других оказывающих влияние пространственных данных можно будет добиться высокой точности получаемых расчетных карт вероятности встреч видов.



Таблица 2

Table 2

Оценка площади и числа фрагментов в разных вариантах моделей для *Vipera renardi* на территории Харьковской области
Estimation of the area and the number of fragments in the different variants of the models for *Vipera renardi* within the Kharkov region

Способ построения модели	Значение площади, км ² S (Min-Max)/число фрагментов в модели с разной вероятностью встречи вида				
	50–60%	60–70%	70–80%	80–90%	90–100%
Bioclim	4524.18 (0.54–2126.19)/615	1705.99 (0.54–618.18)/467	1165.53 (0.55–792.18)/137	47.84 (0.56–40.52)/4	–
Bioclim settlement	4519.16 (0.54–2126.19)/608	1704.32 (0.54–618.18)/464	1164.97 (0.55–792.18)/136	47.84 (0.56–40.52)/4	–
Bioclim+	4802.09 (0.54–2396.17)/736	1791.35 (0.54–466.86)/618	977.35 (0.55–527.36)/184	74.81 (0.56–41.08)/15	–
Bioclim+ settlement	4799.31 (0.54–2396.17)/731	1788.56 (0.54–486.86)/614	976.79 (0.55–527.36)/183	74.18 (0.56–41.08)/15	–
Landsat (spring)	4467.23 (9×10 ⁻³ –44.66)/644347	2801.98 (9×10 ⁻³ –24.04)/397064	762.96 (9×10 ⁻³ –1.83)/166645	186.65 (9×10 ⁻³ –1.24)/31833	4.92 (9×10 ⁻³ –0.35)/844
Landsat (spring) settlement	4079.91 (9×10 ⁻³ –44.66)/521129	2569.67 (9×10 ⁻³ –24.04)/325689	671.96 (9×10 ⁻³ –1.83)/135970	166.24 (9×10 ⁻³ –1.24)/25215	4.52 (9×10 ⁻³ –0.35)/701
Landsat (autumn)	6311.93 (9×10 ⁻³ –42.46)/562649	2595.93 (9×10 ⁻³ –51.09)/335753	669.18 (9×10 ⁻³ –12.32)/100156	137.61 (9×10 ⁻³ –3.05)/14002	10.67 (9×10 ⁻³ –1.82)/779
Landsat (autumn) settlement	5811.45 (9×10 ⁻³ –42.46)/466610	2391.79 (9×10 ⁻³ –51.09)/277158	625.45 (9×10 ⁻³ –12.32)/85688	132.85 (9×10 ⁻³ –3.05)/1211	10.43 (9×10 ⁻³ –1.82)/701

Примечание см. Таблица 1.

Заключение

1. Модели, построенные для небольших географических регионов на основе биоклиматических данных, имеют относительно невысокую точность, что связано с низким пространственным разрешением биоклиматических данных базы WorldClim. Повысить точность таких моделей можно за счет увеличения объема обучающей выборки (числа точек обнаружения вида). Действенным шагом к уточнению результатов моделирование может стать также создание региональных наборов биоклиматических данных, с более высоким пространственным разрешением, чем в базе WorldClim.

2. Космические снимки позволяют снять ограничения моделирования, которые задаются низким пространственным разрешением биоклиматических данных. Но при использовании космических снимков высокого пространственного разрешения повышаются требования к точности координатной привязки точек обнаружения вида.

3. При моделировании потенциального распространения вида для небольших географических регионов более правдоподобные результаты показывает метод, основанный на использовании космических снимков. Результаты его применения в дальнейшем можно использовать как основу для изучения метапопуляционной структуры вида и естественной дизъюнкции видового ареала.

4. Модели распространения видов, выполненные на основе биоклиматических данных и данных дистанционного зондирования целесообразно использовать как взаимодополняющие друг друга, поскольку эти модели передают влияние разных факторов на формирование видового ареала. Наиболее полным это взаимодополнение



может быть при близком пространственном разрешении биоклиматических данных и космических снимков.

5. При моделировании ареала вида нужно учитывать его антропогенную фрагментированность на локальном уровне. Неблагоприятные для обитания вида участки необходимо исключать из результатов моделирования. Это позволяет добиться более точных результатов в оценки вероятности обнаружения вида на исследуемой территории.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 15-35-50221 мол_нр.

Список литературы References

1. Акімов І.А. (ред.). 2009. Червона книга України. Тваринний світ. К., Глобалконсалтинг, 600.
Akimov I.A. (ed.). 2009. Chervona knyha Ukrainy. Tvarynnyj svit [The Red book of Ukraine. Fauna]. K., Globalkonsalting, 600. (in Ukrainian)
2. Ананьева Н.Б., Голынский Е.А. 2013. Анализ распространения горной кольцехвостой туркестанской агамы *Paralaudakia lehmanni* (Nikolsky, 1896): использование программы Максент. Труды Зоологического института РАН, 317 (4): 425–437.
Anan'eva N.B., Golynskiy E.A. 2013. Analysis of the distribution of the rock agama *Paralaudakia lehmanni* (Nikolsky, 1896): implementation of the MaxEnt programme. Trudy Zoologicheskogo instituta RAN, 317 (4): 425–437. (in Russian)
3. Ананьева Н.Б., Боркин Л.Я., Даревский И.С., Орлов Н.Л. 1998. Земноводные и пресмыкающиеся. Энциклопедия природы России. М., ABF, 576.
Anan'eva N.B., Borkin L.Ya., Darevskiy I.S., Orlov N.L. 1998. Zemnovodnye i presmykayushchiesya. Entsiklopediya prirody Rossii [Amphibians and reptiles. Encyclopedia of nature of Russia]. Moscow, ABF, 576. (in Russian)
4. Банников А.Г., Даревский И.С., Ищенко В.Г., Рустамов А.К., Щербак Н.Н. 1977. Определитель земноводных и пресмыкающихся фауны СССР. М., Просвещение, 416.
Bannikov A.G., Darevskiy I.S., Ishchenko V.G., Rustamov A.K., Shcherbak N.N. 1977. Opredelitel' zemnovodnykh i presmykayushchikhsya fauny SSSR [Keys to amphibians and reptiles of fauna of the USSR]. Moscow, Prosveshchenie, 416. (in Russian)
5. Болотов И.И., Фролов А.А. 2015. Моделирование ареала и анализ вклада факторов в климатическую нишу *Parnassius mnemosyne* L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Естественные науки, 1: 56–67.
Bolotov I.I., Frolov A.A. 2015. Modeling of the areal and analysis of the factors' contribution in the climatic niche *Parnassius mnemosyne* L. 1758 (Lepidoptera: Papilionidae). Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Estestvennye nauki, 1: 56–67. (in Russian)
6. Андриєнко Т.Л., Білик Г.І., Брэдїс Є.М., Голубець М.А., Махаєва Л.В., Рубцов М.І., Ткаченко В.С., Шеляг-Сосонко Ю.Р. 1977. Геоботаничне районування Української РСР. К., Наукова думка, 303.
Andrijenko T.L., Bilyk G.I., Bradis Je.M., Golubec' M.A., Mahajeva L.V., Rubcov M.I., Tkachenko V.S., Sheljag-Sosonko Ju.R. 1977. Geobotanichne rajonuvannja Ukrain's'koi' RSR [Geobotanical zoning of the Ukrainian SSR]. Kiev, Naukova dumka, 303. (in Ukrainian)
7. Дирипаско О.А., Демченко Н.А., Кулик П.В., Заброта Т.А. 2008. Расширение ареала солнечного окуня, *Lepomis gibbosus* (Centrarchidae, Perciformes), на восток Украины. Вестник зоологии, 42 (3): 269–273.
Diripasko O.A., Demchenko N.A., Kulik P.V., Zabroda T.A. 2008. Enlargement of the areal of the sunfish, *Lepomis gibbosus* (Centrarchidae, Perciformes), to the East of Ukraine. Vestnik zoologii, 42 (3): 269–273. (in Russian)
8. Джиллер П. 1988. Структура сообществ и экологическая ниша. Пер. с англ. М., Мир, 184. (Giller P. 1988. Community Structure and the Niche. London, Chapman and Hall, 184).
Giller P. 1988. Struktura soobshchestv i ekologicheskaya nisha [Community Structure and the Niche]. Moscow, Mir, 184. (Giller P. 1988. Community Structure and the Niche. London, Chapman and Hall, 184.). (in Russian)
9. Дудов С.В. 2014. Моделирования распространения сосудистых растений нижнего горного пояса хр. Тукурингра по данным рельефа и дистанционного зондирования (Зейский заповедник, Амурская область). В кн.: Перспективы развития и проблемы современной ботаники. Материалы



- III (V) Всероссийской молодежной конференции с участием иностранных ученых (Новосибирск, 10–14 ноября 2014 г.). Новосибирск, Изд-во «Академиздат»: 216–217.
- Dudov S.V. 2014. Species distribution modelling using remote sensing data: a case study on vascular plants of Tukhuringra low mountain belt (Zeya Nature Reserve, Amur district). *In: Perspektivy razvitiya i problemy sovremennoy botaniki. Materialy III (V) Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* (Novosibirsk, 10–14 nojabrja 2014 g.) [Perspectives of the development and problems of modern botany. Materials of the 3d (5th) All-Russian youth conference with the participation of foreign scientists (Novosibirsk, 10-14 november, 2014)]. Novosibirsk, Izd-vo "Akademizdat": 216–217. (in Russian)
10. Желтухин А.С., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Сандлерский Р.Б., Кораблев Н.П. 2007. Применение современных методов сбора и анализа полевых материалов при составлении карты местообитаний и оценке качества среды млекопитающих и птиц в заповедниках. Труды Центрально-Лесного Государственного природного биосферного заповедника, 5: 227–244.
- Zheltukhin A.S., Puzachenko Yu.G., Kozlov D.N., Sandlerskiy R.B., Korablev N.P. 2007. Implementation of the modern methods of collection and analysis of the field materials while mapping habitats of mammals and birds in the nature reserves and estimating its quality. *Trudy Tsentral'no-Lesnogo Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika*, 5: 227–244. (in Russian)
11. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. 2004. Аэрокосмические методы географических исследований. М., Академия, 336.
- Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. 2004. Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy [Aerospace methods of geographical researches]. Moscow, Akademiya, 336. (in Russian)
12. Кукушкин О.В. 2013. О закономерностях в распространении обыкновенной сольпуги (Arachnida, Solifugae, Galeodidae) на юге Украины. Самарская лука. Проблемы региональной и глобальной экологии, 22 (3): 129–143.
- Kukushkin O.V. 2013. About regularities in distribution of solpugid (Arachnida, Solifugae, Galeodidae) on the South of Ukraine. *Samarskaya luka. Problemy regional'noy i global'noy ekologii*, 22 (3): 129–143. (in Russian)
13. Олонова М.В., Гао, Х. 2014. Потенциальные возможности распространения адвентивного растения *Poa compressa* L. в Сибири. Вестник Томского государственного университета. Биология, 28 (4): 56–69.
- Olonova M.V., Gao, X. 2014. Potentialities of distribution of adventitious plant *Poa compressa* L. in Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 28 (4): 56–69. (in Russian)
14. Пузаченко Ю.Г. 2004. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М., Academia, 406.
- Puzachenko Yu.G. 2004. Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh [Mathematical methods in ecological and geographical researches]. Moscow, Academia, 406. (in Russian)
15. Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Сандлерский Р.Б. 2010. Анализ пространственно-временной динамики экологической ниши на примере популяции лесной куницы (*Martes martes*). Журнал общей биологии, 71 (6): 467–487.
- Puzachenko Yu.G., Zheltukhin A.S., Sandlerskiy R.B. 2010. Analysis of the space-time dynamics of ecological niche by example of the marten's population (*Martes martes*). *Zhurnal obshchei biologii*, 71 (6): 467–487. (in Russian)
16. Рева М.Л., Тараненко Л.И., Молодан Г.В., Панченко А.Б., Рязанцева А.Е., Ярошенко Н.Н. 1989. Страницы красной книги. Научно-популярные очерки. Донецк, Донбасс, 111.
- Reva M.L., Taranenko L.I., Molodan G.V., Panchenko A.B., Ryazantseva A.E., Yaroshenko N.N. 1989. *Stranitsy krasnoy knigi. Nauchno-populyarnye ocherki* [Pages of the Red book. Popular science essays]. Donetsk, Donbass, 111. (in Russian)
17. Смирнов Н.А. 2013. Распространение *Rana dalmatina* (Ranidae, Anura) в Украине. Современная герпетология, 13 (1/2): 47–57.
- Smirnov N.A. 2013. Distribution of *Rana dalmatina* (Ranidae, Anura) in Ukraine. *Sovremennaya gerpetologiya*, 13 (1/2): 47–57. (in Russian)
18. Смирнов Н.А. 2013. Анализ распространения альпийского тритона, *Ichthyosaura alpestris* (Caudata, Salamandridae) в Украине. Праці Українського герпетологічного товариства, 4: 156–164.
- Smirnov N.A. 2013. Analysis of the distribution of alpine newt, *Ichthyosaura alpestris* (Caudata, Salamandridae) in Ukraine. *Praci Ukraїn's'kogo gerpetologichnogo tovaristva*. 4: 156–164. (in Russian)
19. Титар В.М. 2006. Моделирование ареалов и очагов иксодовых клещей в условиях глобальных изменений климата. В кн.: Достижения и перспективы развития современной паразитологии. Труды Пятой республиканской научно-практической конференции. Витебск, Изд-во ВГМУ: 356–360.



Titar V.M. 2006. Modeling of the areals and seats of ticks under the condition of global climate changes. *In: Dostizheniya i perspektivy razvitiya sovremennoy parazitologii. Trudy Pjatoj respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Achievements and perspectives of the development of modern parasitology. Proceedings of the 5th republican theoretical and practical conference].* Vitebsk, Izd-vo VGMU: 356–360. (in Russian)

20. Титар В.М. 2011. Аналіз ареалів видів: підхід, заснований на моделюванні екологічної ніши. *Вестник зоологии. Отдельный выпуск*, 25: 93.

Tytar V.M. 2011. Analysis of the areals of species: an approach based on the ecological niche modeling. *Vestnik zoologii. Otdel'nyy vypusk*, 25: 93. (in Ukrainian)

21. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В., Краснощечков А.Н. 2005. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М., Академический проект, 325.

Trifonova T.A., Mishchenko N.V., Krasnoshchekov A.N. 2005. Geoinformatsionnye sistemy i distantsionnoe zondirovanie v ekologicheskikh issledovaniyakh [Geoinformation systems and remote probing in ecological researches]. Moscow, Akademicheskiy proekt, 325. (in Russian)

22. Тупиков А.И., Зиненко А.И. 2015. Распространение узорчатого полоза *Elaphe dione* (Reptilia, Colubridae) в Украине: исторический аспект и современное состояние. *Вестник Днепропетровского национального университета. Серия Биология*, 23 (2): 91–99.

Tupikov A.I., Zinenko A.I. 2015. The distribution of the Dione snake *Elaphe dione* (Reptilia, Colubridae) in Ukraine: historical aspect and the current state. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta. Seriya Biologiya*, 23 (2): 91–99. (in Russian)

23. Тупиков А.И., Зиненко А.И. 2015. Распространение степной гадюки *Vipera renardi* (Reptilia, Viperidae) в Харьковской области. *Вестник Днепропетровского национального университета. Серия Биология*, 23 (2): 172–176.

Tupikov A.I., Zinenko A.I. 2015. Distribution of the Steppe viper *Vipera renardi* (Reptilia, Viperidae) in the Kharkov region. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta. Seriya Biologiya*, 23 (2): 172–176. (in Russian)

24. Уиттекер Р. 1980. Сообщества и экосистемы. Пер. с англ. М., Прогресс, 328. (Whittaker H. Robert. 1975. *Communities and Ecosystems*. New York, Macmillan Publishing Co., 328).

Whittaker R. 1980. Soobshchestva i ekosistemy [Communities and Ecosystems]. Moscow, Progress, 328. (Whittaker H. Robert. 1975. *Communities and Ecosystems*. New York, Macmillan Publishing Co., 328).

25. Фалейчик Л.М., Кирилюк О.К., Помазкова Н.В. 2013. Опыт применения ГИС-технологий для оценки масштабов воздействия горнопромышленного комплекса на природные системы Юго-Востока Забайкалья. *Вестник ЗабГУ*, 97 (6): 64–79.

Faleychik L.M., Kirilyuk O.K., Pomazkova N.V. 2013. Experience of the implementation of GIS-technologies for the evaluation of the impact scale of the mining complex to the natural systems of Southeast Transbaikalia. *Vestnik ZabGU*, 97 (6): 64–79. (in Russian)

26. Хански И. 2010. Ускользящий мир: Экологические последствия утраты местообитаний. Пер. с англ. М., Товарищество научных изданий КМК, 340. (Hanski I. 2010. *The Shrinking world: ecological consequences of habitat loss*. Oldendorf/Luhe, International Ecology Institute, 340).

Hanski I. 2010. Uskol'zayushchiy mir: Ekologicheskie posledstviya utraty mestoobitaniy [The Shrinking world: ecological consequences of habitat loss]. Moscow, Tovarishhestvo nauchnykh izdaniy KMK, 340. (Hanski I. 2010. *The Shrinking world: ecological consequences of habitat loss*. Oldendorf/Luhe, International Ecology Institute, 340.). (in Russian)

27. Шалыт М.С., Калмыкова А.А. 1935. Степные пожары и их влияние на растительность. *Ботанический журнал*, 20 (1): 100–110.

Shalyt M.S., Kalmykova A.A. 1935. Steppe fires and their influence on vegetation. *Botanicheskiy zhurnal*, 20 (1), 100–110. (in Russian)

28. Amaral S., Costa C.B., Renno C.D. 2007. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) improving species distribution models: an example with the neotropical genus *Coccocypselum* (Rubiaceae). *Anais XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (Florianopolis, Brasil, 21–26 abril 2007)*: 2275–2282.

29. Araujo M.B., Thuiller W., Pearson R.G. 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *J. Biogeography*, 33 (10): 1712–1728.

30. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudik M., Chee Y.E., Yates C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17 (1): 43–57.

31. Fischer J., Lindenmayer B. David. 2007. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 16 (3): 265–280.

32. García-Marmolejo G., Chapa-Vargas L., Huber-Sannwald E., Weber M., Rosas-Rosas O.C., Martínez-Calderas J. 2013. Potential distributional patterns of three wild ungulate species in a fragmented tropical region of northeastern Mexico. *Mongabay.com Open Access Journal. Tropical Conservation Science*, 6 (4): 539–557.



33. Gibbons, J.F., Scott, D.E., Ryan, T.J., Buhlmann, K.A., Tuberville, T.D., Metts, B.S., Greene, J.L., Mills, T., Leiden, Y., Poppy, S., Winne, C.T., 2000. The Global Decline of Reptiles, Déjà Vu Amphibians. Available at: <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/50/8/653.full.pdf+html>.
34. Hanski I. 2011. Habitat Loss, the Dynamics of Biodiversity, and a Perspective on Conservation. *AMBIO*, 40 (3): 248–255.
35. Hijmans R. J., Cameron, S., Parra, J. 2015. Worldclim database. Version 08.2015. Available at: <http://www.worldclim.org/current>.
36. Paritsis J., Holz A., Veblen T.T., Kitzberger T. 2013. Habitat distribution modeling reveals vegetation flammability and land use as drivers of wildfire in SW Patagonia. *Ecosphere*, 4 (5): 1–20.
37. Pauli D.B., Linder G., Bishop C.A., Krest S.K. (ed.). 2010. *Exotoxicology of Amphibians and Reptiles*. Setac, Pensacola. Available at: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=__7LBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA203&dq=Vipera+pesticides&ots=WsO9_AO-1S&sig=exEufo_aWaoRqUJr6JQ7E3nNQZs&redir_esc=y#v=onepage&q=Vipera%20pesticides&f=false
38. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231–259.
39. Phillips S. 2015. Maxent software for species habitat modeling. Version 08.2015. Available at: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>
40. Phillips S.J., Dudik M. 2008. Modeling of species distribution with MAXENT: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161–175.
41. Reading C.J., Luiselli L.M., Akani G.C., Bonnet X., Amori G., Ballouard J.M., Filippi E., Naulleau G., Pearson D., Rugiero L., 2010. Are snake populations in widespread decline? Available at: <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/early/2010/06/03/rsbl.2010.0373.short>
42. Santos X., Brito J.C., Sillero N., Pleguezuelos J.M., Llorente G.A., Fahd S., Parelada X. 2006. Inferring habitat-suitability areas with ecological modelling techniques and GIS: A contribution to assess the conservation status of *Vipera latastei*. *Biological Conservation*, 130 (3): 416–425.
43. Soberon J., Peterson A. T. 2005. Interpretations of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2: 1–10.
44. Zinenko O.I. 2006. Reptiles of the forest-steppe zone of Left-bank Ukraine. Abstract of dissertation thesis. Kyiv, 21.