

УДК 574.9:57.045:632.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА *CYDALIMA PERSPECTALIS* (LEPIDOPTERA, CRAMBIDAE) В ЕВРАЗИИ

© 2024 г. И. О. Попов^{1, 2, *}, Е. Н. Попова^{2, **}

¹Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля
ул. Глебовская, 20Б, Москва, 107258 Россия

²Институт географии РАН
Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017 Россия

*E-mail: igor_o_popov@mail.ru

**E-mail: en_popova@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 08.01.2024 г.

Принята в печать 04.08.2024 г.

Проведено моделирование современного климатического ареала опасного вредителя растений рода самшит (*Vixus* L.) самшитовой огневки (*Cydalima perspectalis* Walker, 1859) в Евразии с целью определения возможных территорий его дальнейшей экспансии. Из разных источников (базы данных о распространении видов и публикации) собраны сведения о локусах фактического обнаружения самшитовой огневки как в нативной (Восточная и Южная Азия), так и в инвазионной (Европа и Западная Азия) частях ареала. В качестве предикторов распространения использовали шесть биоклиматических параметров: три температурных и три влажностных. Разработаны и применены оригинальные методики определения числа точек псевдо-отсутствия и их селективной генерации. Окончательная классификация и разбиение пространства биоклиматических факторов осуществлялись с помощью градиентного бустинга. Рассчитан и картографирован современный евразийский климатический ареал самшитовой огневки. Показано, что инвазия еще не достигла своих пределов и имеется ряд территорий в Евразии, где климатические условия благоприятны для появления популяций этого вида как в нативной части ареала (отдельные южные и восточные регионы Китая, КНДР и южные предгорья Гималаев), так и в инвазионной его части (в Северной и Восточной Европе, на Кавказе, в Турции). Дана сравнительная оценка важности разных климатических факторов в определении территории распространения данного вида. Установлено, что наибольшей важностью для построения модели климатического ареала *C. perspectalis* обладает сумма осадков самого сухого месяца (47.6%). Выявлено различие в климатических условиях между нативной и инвазионной частями ареала и сделаны предположения о возможных причинах его возникновения.

DOI: 10.31857/S0044459624040044, EDN: UTNJYP

Самшитовая огневка (*Cydalima perspectalis* Walker, 1859) – опасный облигатный вредитель растений рода самшит (*Vixus* L.) из семейства огневок-травянок (Crambidae, Lepidoptera), способный приводить к полной дефолиации самшитовых деревьев, их угнетению и усыханию (Гниненко и др., 2014). Ранее вид был также отнесен к родам: *Phakellura*, *Glyphodes*, *Diaphania* и *Neoglyphodes* (Mally, Nuss, 2010). Гусеницы *C. perspectalis* питаются в основном зелеными частями растений, однако при недостатке пищи могут объедать и кору деревьев (Щуров, 2014; Нестеренкова и др., 2017). После завершения питания они окукливаются в паутинных коконах

в комках высохших листьев кормового растения, лишая его эстетической привлекательности (Гниненко и др., 2014). За год может развиваться от двух до пяти поколений этого вредителя (Гниненко и др., 2018). Нативный ареал самшитовой огневки включает Китай, Японию, Корейский полуостров, Приморский край Российской Федерации (Inoue et al., 1982; Определитель насекомых..., 2005). Имеются сведения о находках *C. perspectalis* на территории современного Пакистана – бывшей Британской Индии (Hampson, 1896).

В начале XXI в. этот вид был случайно завезен в Западную Европу, где стал стремительно

распространяться. Инвазия началась в 2006 г., когда самшитовая огневка была обнаружена в Германии, в г. Вайль-на-Рейне (Weil am Rhein), куда она, по-видимому, была завезена из Китая вместе с саженцами самшита (Krüger, 2008). В 2007 г. вредитель уже был обнаружен в Британии, Нидерландах (Muus et al., 2009) и Швейцарии (Billen, 2007), в 2008 г. зафиксированы первые случаи обнаружения самшитовой огневки во Франции (Feldtrauer et al., 2009), в 2009 г. — в Австрии и Лихтенштейне (Slamka, 2022). К настоящему времени документировано распространение *C. perspectalis* также в следующих странах: Ирландия, южные регионы Швеции, Испания, Португалия, Польша, Чехия, Словакия, Венгрия, Хорватия, Сербия, Македония, Греция, Болгария, Италия, Мальта, Турция (Bras et al., 2019; Slamka, 2022). Из Турции *C. perspectalis* проникла в Грузию, где в 2012 г. была впервые обнаружена в окрестностях г. Батуми (Гниненко и др., 2016). Результаты исследований геномов самшитовой огневки из разных европейских популяций позволяют говорить о нескольких независимых случаях интродукции этого вида из нативной части ареала, преимущественно из Восточного Китая (Bras et al., 2019).

В России самшитовая огневка впервые была обнаружена в Краснодарском крае в г. Сочи в 2012 г., куда она была завезена из Италии вместе с зараженными саженцами самшита, поставляемыми в связи с подготовкой к Олимпиаде (Ескин, Бибин, 2014). Самшитовая огневка быстро распространилась по Северному Кавказу и южным регионам России, где нанесла серьезный ущерб зарослям реликтового колхидского самшита (*Buxus colchica*) (Гниненко и др., 2014, 2016; Matsiakh et al., 2018). В 2013 г. *C. perspectalis* обнаружена в Чеченской республике в г. Грозном (Проклов, Караева, 2013). В 2014 г. она проникла в Абхазию (Лукмазова, 2014; Щуров, 2014). В 2015 г. вредитель распространился по территории Крыма (в Симферополе, Никитском Ботаническом саду и Карадагском природном заповеднике), хотя имеются сведения о первых единичных находках еще в 2014 г. (Будашкин, 2016; Стрюкова, 2016; Трикоз, Халилова, 2016). Также в 2015 г. самшитовая огневка впервые обнаружена в Республике Северная Осетия — Алания (Доброносков, 2017), в Адыгее и Ставропольском крае (Нестеренкова и др., 2017).

Таким образом, современный ареал самшитовой огневки делится на две четко обособленные части: нативную (Восточная и Южная Азия) и инвазионную (Европа и Западная Азия).

Самшитовая огневка способна развиваться на большинстве евразийских видов р. *Buxus* L. Всего род насчитывает 102 вида (WFO Plant List: <https://wfoplantlist.org/plant-list/taxon/wfo-4000005846-2023-06?page=1>). Наиболее часто отмечено питание вредителя на таких видах, как самшит китайский (*Buxus sinica*), самшит мелколистный (*B. microphylla*) и самшит вечнозеленый (*B. sempervirens*) (Будашкин, 2016; Гниненко и др., 2018). Ряд авторов отмечают также возможность питания *C. perspectalis* и на других растениях: пахизандре верхушечной (*Pachysandra terminalis*), падубе пурпурном (*Ilex purpurea*), бересклетах японском (*Euonymus japonicus*) и крылатом (*E. alatus*) и некоторых других (Щуров, 2014; Будашкин, 2016; Гниненко и др., 2018). Однако, по-видимому, гусеницы самшитовой огневки при питании не на самшите, а на растениях других родов, не могут успешно завершить свое развитие (Гниненко и др., 2018). В лабораторных исследованиях гусеницы *C. perspectalis* отказывались употреблять в пищу листья растений не р. *Buxus*, проявляя себя как типичный олигофаг (Нестеренкова и др., 2017; Гниненко и др., 2018). Все эти данные свидетельствуют о том, что вне самшитовых насаждений данный вредитель существовать не может.

В настоящее время ареал самшита, включая регионы его искусственного разведения, гораздо обширнее ареала его вредителя *C. perspectalis* (Di Domenico et al., 2012; Kenis et al., 2013; PictureThis, 2023). Евроазиатский ареал р. *Buxus* простирается от Британских островов до Суматры и занимает Южную, значительную часть Западной Европы, Закавказье, Переднюю Азию, Китай и Японию. В Азии произрастает всего около 20 видов самшита. В КНР, которая является, как показали генетические исследования, основным источником инвазии самшитовой огневки в Европе (Bras et al., 2019), в природе известно 17 видов р. *Buxus* (Min, Brückner, 2008; Atlas of Woody Plants..., 2011). Как минимум 10 азиатских видов могут быть растениями-хозяевами для самшитовой огневки (Wan et al., 2014). В Западной и Южной Европе с древних времен распространены два вида — *B. sempervirens* и *B. balearica* (Di Domenico et al., 2012; Mitchell et al., 2018), которые являются хорошей кормовой базой для гусениц самшитовой огневки (Matsuyama, Shinkaji, 1991; Wan et al., 2014). В России на территории Краснодарского края и Кавказа находятся реликтовые насаждения самшита колхидского (*B. colchica*), который внесен в Красную Книгу РФ (Гниненко и др., 2014).

Также на территории прикаспийского региона, в том числе на территории Азербайджана, произрастает *B. hyrcana* (Esmailnezhad et al., 2020). Согласно современным представлениям, *B. colchica* и *B. hyrcana* являются, скорее всего, синонимами или подвидами *B. sempervirens* (Di Domenico et al., 2011). Кроме того, на протяжении длительного времени самшит широко используется как декоративное растение практически на всей территории Евразии, за исключением отдельных северных регионов. Получены морозо- и засухоустойчивые сорта растений этого рода, что позволяет при должном уходе выращивать их даже на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке, поэтому распространение растений-хозяев не является фактором, ограничивающим расширение ареала самшитовой огневки на значительной части Евразии. Кроме того, к настоящему времени нет сведений о патогенах или хищниках, способных существенно влиять на популяции самшитовой огневки (Wan et al., 2014; Гниненко и др., 2018). Рельеф, расстояния, городская среда также не могут быть непреодолимыми препятствиями для распространения этого вредителя, поскольку основным способом его расселения является перенос вместе с посадочным материалом. Таким образом, основным фактором, определяющим пределы инвазии *C. perspectalis*, является климат. В связи с этим представляется актуальной проблема прогнозирования возможностей для ее дальнейшей экспансии.

Моделирование распространения видов (Species distribution modeling – SDM) является бурно развивающейся областью науки на стыке разных дисциплин (Peterson et al., 2011; Peterson, 2014; Araújo et al., 2019; Srivastava et al., 2019; Zurell et al., 2020; Sillero et al., 2021). Моделирование потенциальной территории распространения вида основывается на моделировании его экологической ниши – области пространства экологических признаков, в пределах которой исследуемый вид может существовать и образовывать устойчивые популяции (Soberón, 2007). В моделировании в качестве предикторов могут использоваться разные экологические факторы, но наиболее часто применяются климатические, в первую очередь температурные и влажностные, как определяющие общий экологический фон существования живых организмов (Franklin, 2009; Попова, Попов, 2013, 2019).

Существует несколько подходов к моделированию экологической ниши. Одним из них является создание механистической модели существования вида, реализованной, например,

в пакете CLIMEX. Данный подход использует знания о влиянии различных экологических факторов (в первую очередь климатических) на жизненный цикл вида для построения модели экологической ниши и моделирования возможного ареала. Этот метод был использован в работе Накамбо с соавт. (Nacambo et al., 2014) для моделирования потенциального ареала *C. perspectalis* в Евразии.

Другим широко применяемым подходом является корреляционное моделирование, использующее сведения о фактическом распространении вида и эколого-климатической ситуации в местах его обнаружения с дальнейшим построением модели зависимости возможного распространения от значений экологических факторов. Для построения такой модели в настоящее время используется ряд алгоритмов, в том числе основанных на методах машинного обучения, поскольку в целом моделирование экологической ниши при корреляционном подходе сводится к двухклассовой классификации – стандартной задаче машинного обучения.

Важной проблемой, возникающей при использовании методов машинного обучения для моделирования ареала, является дефицит данных о точно установленных местах отсутствия вида (Franklin, 2009; Wisz, Guisan, 2009; Peterson et al., 2011; Barbet-Massin et al., 2012; Srivastava et al., 2019). Обычные источники сведений о распространении видов (коллекции, литературные сведения, базы данных) почти всегда содержат информацию о присутствии вида. В то же время построение модели, как правило, требует наличия сведений об обоих классах: положительном и отрицательном. Данная проблема имеет несколько способов решения.

Алгоритмы первого типа не требуют наличия сведений о территории за пределами географического ареала вида или области виртуального пространства признаков вне области экологической ниши. К этому типу относились первые методы, специально разработанные для моделирования ареалов (например, BIOCLIM, DOMAIN и др.), которые разделяли пространство признаков на области, принадлежащие экологической нише или находящиеся вне ее, с помощью “окружения” областей точек распространения видов простыми геометрическими фигурами, например, гиперкубом в случае BIOCLIM (Booth et al., 2014) или более сложными фигурами, как в случае алгоритма DOMAIN (Carpenter et al., 1993). При простоте такие методы страдают очевидной

высокой неточностью и тенденцией к слишком большим ложноположительным ошибкам классификации. Однако, несмотря на эти недостатки, они все еще используются в моделировании распространения видов (Xie et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Более совершенными являются одноклассовые методы классификации: например, одноклассовый метод опорных векторов (oneclass support vector machine – OCSVM), изолирующий лес (isolation forest), нейронные сети автодекодеры и другие алгоритмы, используемые также в задачах выявления выбросов в данных (Guo et al., 2005; Liu et al., 2008; Noumir et al., 2012). Однако основная проблема таких методов – трудность подбора гиперпараметров применяемых алгоритмов машинного обучения.

Альтернативным подходом является рандомная генерация точек псевдо-отсутствия (pseudo-absence points), с определенной степенью достоверности аппроксимирующей область вне ареала (при их создании в географическом пространстве) или вне экологической ниши, с дальнейшим применением стандартных методов классификации (Peterson et al., 2011; Hanberry et al., 2012). Простейшим вариантом такого подхода служит не-селективная генерация точек псевдо-отсутствия на всем исследуемом географическом пространстве, их проекция в пространство экологических признаков и классификация на полученном наборе образцов. Очевидно, такой подход чреват высокой вероятностью ложноотрицательной классификации (Wisz, Guisan, 2009). При селективной генерации точки псевдо-отсутствия отсеиваются из области пространства признаков (или иногда из географического пространства), с большой долей вероятности относящейся к положительному классу (Barbet-Massin et al., 2012; Senay et al., 2013; Wang et al., 2023b). Для этого производится предварительная классификация с использованием одноклассовых или простых двухклассовых методов. Рекомендации по использованию того или иного подхода, например, об оптимальном числе точек псевдо-отсутствия, о параметрах предварительной их селекции и т.д., обычно имеют общий характер и даются на основе сравнительных экспериментов на искусственных наборах данных (Mateo et al., 2010). Стоит заметить, что обычно подбор гиперпараметров одноклассовых методов также включает генерацию точек псевдо-отсутствия (Mack et al., 2014; Wang et al., 2018).

Широко применяющийся в моделировании ареалов метод MAXENT представляет еще один

подход, не требующий генерации точек псевдо-отсутствия. Однако этот алгоритм включает генерацию так называемых фоновых точек для оценки функции распределения параметров окружающей среды. Их рекомендуемое число также имеет обобщенный характер, притом что его изменение может сильно повлиять на конечный результат (Phillips et al., 2004, 2006). MAXENT был применен для моделирования потенциальной территории распространения *C. perspectalis* в Евразии в статье Канеллеса и соавт. (Canelles et al., 2021).

Целью настоящей работы стало создание корреляционной модели современного климатического ареала самшитовой огневки в Евразии и идентификация областей ее дальнейшей возможной инвазии на этом материке. Под климатическим ареалом понимается область географического пространства, в каждой точке которой климатические условия допускают устойчивое существование популяций исследуемого вида (Hughes et al., 1996; Gaston, 2003; Попова, Попов, 2019; Богданович и др., 2023). При создании этой модели нами была применена оригинальная методика генерирования точек псевдо-отсутствия, принадлежащих к области вне экологической ниши в виртуальном пространстве признаков, с использованием современных методов нивелирования дисбаланса численности образцов разных классов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные о распространении C. perspectalis

Сведения о распространении самшитовой огневки в Евразии были взяты из трех источников.

1. База данных Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org, 2020). Из данного источника были взяты сведения о распространении *C. perspectalis* на всей территории Евразии с 1905 по 2020 г., всего 18247 записей. При этом отбирались только данные, содержащие информацию о дате находки и точности локализации.

2. Nation Biodiversity Network Atlas (NBN Atlas, <https://nbnatlas.org/>). Эта база данных содержит информацию о распространении видов, в частности самшитовой огневки, на территории Великобритании. Взято 4646 записей, доступных на 28 августа 2020 г.

3. Поскольку первые два источника содержали крайне мало данных по распространению самшитовой огневки на территории Восточной Европы (включая Россию) и Южной и Восточной

Азии, особенно Китая, была собрана и проанализирована литература, содержащая сведения о местах обнаружения *C. perspectalis*. Всего было проанализировано 78 статей, давших информацию о 320 локализациях вида, значительно дополнивших данные из предыдущих двух источников. Значительная часть данных в этих источниках имела геолокационную привязку с точностью вплоть до секунд. В ряде статей давались только названия населенных пунктов. В таких случаях в качестве координат находок брались координаты центра данного поселения. Поскольку все они имели небольшие размеры, ошибка геопозиционирования может считаться незначительной.

В результате были получены сведения о 23213 локализациях *C. perspectalis* на территории Евразии. Особенностью полученного набора данных является их большая пространственная неравномерность: для Западной Европы, особенно Великобритании, плотность локализаций чрезвычайно велика, для других областей Евразии (особенно Восточной Европы и Китая) напротив — очень низка. Подобная неравномерность может привести к эффектам смещения при генерации точек псевдо-отсутствия и в результате к ошибкам моделирования экологической ниши. Для нивелирования этих нежелательных последствий, а также для элиминации случаев дублирования данных, сначала было осуществлено прореживание локализаций, расположенных друг к другу ближе, чем на 10 км, согласно рекомендации (Radosavljevic, Anderson, 2014).

Эти и другие расчеты проводились с помощью скриптов, написанных на языке программирования Python 3. После выполнения данного алгоритма над изначальным набором данных о распространении *C. perspectalis* было получено 1575 локализаций на территории Евразии, которые и использовались в дальнейшем анализе (Попова, Попов, 2023).

Точки локализации в Евразии были отнесены к трем регионам: нативному ареалу (Восточная и Южная Азия, точки, расположенные восточнее 60° в.д.) и инвазионному ареалу, разделенному на две части — западную (Западная Европа, точки западнее 35° в.д.) и восточную (включает Восточную Европу и Западную Азию, расположен между 35 и 60° в.д.), которые будем условно называть западно-инвазионным и восточно-инвазионным ареалами (или частями ареала). В нативном ареале насчитывается 98 фактических локализаций,

в восточно-инвазионном — 216, в западно-инвазионном — 1261. На рис. 1а представлена карта пространственного распределения этих обнаружений, использованных в дальнейшем построении модели климатического ареала самшитовой огневки. Построение карт осуществлялось в ГИС QGIS.

Климатические данные

В качестве источника данных по климату использовалась база метеоданных CRU TS4.03 Университета Восточной Англии (Harris et al., 2020). Эта база содержит результаты метеонаблюдений месячного разрешения, интерполированные на регулярную пространственную сетку с шагом 0.5°.

На основе этих данных для применения в качестве предикторов распространения *C. perspectalis* были рассчитаны значения 19 стандартных биоклиматических параметров (BIO1–BIO19), отобранных в рамках проекта WorldClim2 для эколого-климатических исследований (Fick, Hijmans, 2017) и широко применяемых в моделировании ареалов (Drake, Bossenbroek, 2004; Bellard et al., 2013; Stoica, 2018; Petrosyan et al., 2023; Wang et al., 2023a) (табл. 1). Использовались средние значения этих параметров для периода 1999–2018 гг., соответствующего временному интервалу большинства обнаружений *C. perspectalis*.

Корреляционный анализ выявил сильные взаимные корреляции многих из этих параметров. Для редукции числа потенциальных предикторов были выявлены шесть групп, характеризующихся наибольшими значениями линейного коэффициента корреляции Пирсона, из которых выбрали по одному параметру, отличающемуся наименьшей средней корреляцией с биоклиматическими параметрами из других групп. В результате были отобраны шесть параметров, использовавшихся в дальнейшем исследовании: BIO2, BIO3, BIO11, BIO14, BIO15, BIO18 (табл. 1). Первые три характеризуют температурные условия внешней среды, остальные — влажностные.

Значения этих параметров, распределенные на регулярной пространственной сетке, были интерполированы на координаты локусов обнаружения самшитовой огневки с помощью кубической интерполяции.

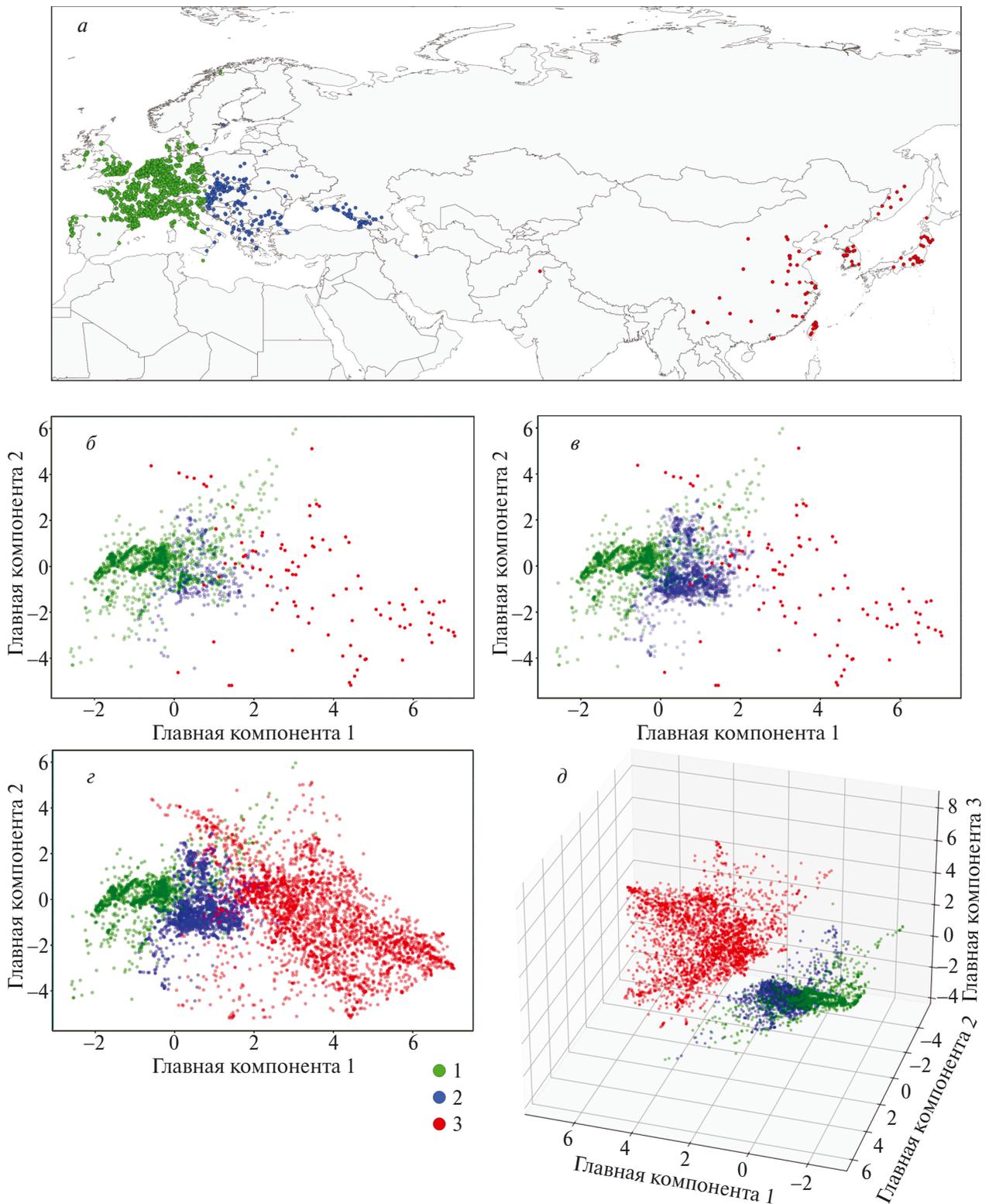


Рис. 1. Точки обнаружения *C. perspectalis*, использованные в данном исследовании: *a* – пространственное распределение точек обнаружения *C. perspectalis*, *б–д* – распределение точек обнаружения *C. perspectalis* в пространстве главных компонент шести биоклиматических параметров на разных стадиях их улучшения (*б* – изначальный набор данных, *в* – данные после воздействия алгоритмом SMOTE на локусы из восточно-инвазионной части ареала, *г* и *д* – данные после воздействия алгоритмом SMOTE на локусы из нативной части ареала в пространстве двух и трех главных компонент соответственно). Условные обозначения: 1 – западно-инвазионная часть ареала, 2 – восточно-инвазионная часть ареала, 3 – нативная часть ареала.

Таблица 1. Биоклиматические параметры, использованные в данном исследовании

ВЮ1	средняя годовая температура
ВЮ2	средний месячный разброс температур ($t_{\max} - t_{\min}$)
ВЮ3	изотермальность ($\text{ВЮ2}/\text{ВЮ7} \times 100$)
ВЮ4	температурная сезонность (стандартное отклонение средних месячных значений $\times 100$)
ВЮ5	максимальная температура самого теплого месяца
ВЮ6	минимальная температура самого холодного месяца
ВЮ7	годовой разброс температур ($\text{ВЮ5} - \text{ВЮ6}$)
ВЮ8	средняя температура самого влажного квартала
ВЮ9	средняя температура самого сухого квартала
ВЮ10	средняя температура самого теплого квартала
ВЮ11	средняя температура самого холодного квартала
ВЮ12	годовая сумма осадков
ВЮ13	сумма осадков самого влажного месяца
ВЮ14	сумма осадков самого сухого месяца
ВЮ15	сезонность осадков (коэффициент вариации месячных сумм осадков)
ВЮ16	сумма осадков самого влажного квартала
ВЮ17	сумма осадков самого сухого квартала
ВЮ18	сумма осадков самого теплого квартала
ВЮ19	сумма осадков самого холодного квартала

Примечание. Жирным шрифтом отмечены параметры, отобранные в качестве предикторов для моделирования климатического ареала *C. perspectalis*.

*Улучшение данных о распространении
C. perspectalis и генерация точек
псевдо-отсутствия*

На рис. 1б представлен график распределения векторов биоклиматических условий в идентифицированных локусах распространения самшитовой огневки в виртуальном пространстве двух главных компонент шести отобранных биоклиматических параметров, объясняющих примерно 60% их дисперсии (в табл. 2 приведены вклады биоклиматических параметров в главные компоненты и значения долей объясненной дисперсии каждой компоненты). На этом рисунке можно увидеть, что локусы в разных регионах

заметно отличаются по климатическим условиям, занимая разные области пространства признаков. При этом визуально выявляется различие в числе обнаружений в разных частях ареала и в их плотности в пространстве признаков. Эта особенность исходных данных — различие в плотности точек в разных областях виртуального пространства признаков — может привести к ошибкам при генерации точек псевдо-отсутствия и при классификации. Для решения этой проблемы производилась генерация искусственных точек обнаружения вида в областях с их низкой плотностью. Целью этой процедуры была, с одной стороны, ликвидация дисбаланса

Таблица 2. Вклад биоклиматических параметров в главные компоненты и значения долей объясненной дисперсии главных компонент

Номер главной компоненты	ВЮ2	ВЮ3	ВЮ11	ВЮ14	ВЮ15	ВЮ18	Доля объясненной дисперсии
1	0.0281	-0.5733	-0.4539	-0.0105	0.4600	0.5028	0.336
2	-0.4585	-0.1111	-0.1319	0.7015	-0.4674	0.2221	0.262
3	-0.3530	0.2160	0.6530	0.0488	0.4119	0.4798	0.177
4	-0.7420	-0.3665	0.0212	-0.4326	-0.0100	-0.3571	0.152
5	-0.3143	0.6751	-0.5695	-0.2548	0.0372	0.2339	0.052
6	0.1229	-0.1489	0.1591	-0.5033	-0.6315	0.534	0.021

в числе обнаружений между разными частями ареала, с другой — повышение плотности образцов в области пространства признаков, аппроксимирующей фундаментальную экологическую нишу вида.

Для генерации был применен алгоритм повышающей балансировки численности образцов SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling TEchnique) (Chawla et al., 2002; Varandela et al., 2003; Хейдт, Груздев, 2019), позволяющий эффективно оценить область их распределения в пространстве признаков и случайным образом генерирующий в ней искусственные образцы минорного класса для достижения паритета в численности с мажорным классом. Использовалась реализация этого алгоритма (и других алгоритмов балансировки классов) в пакете Imbalanced-learn для языка программирования Python 3 (<https://imbalanced-learn.org/stable/>; Lemaître et al., 2017).

Генерация искусственных образцов производилась в несколько этапов. Сначала был ликвидирован дисбаланс между данными из западно-инвазионной и восточно-инвазионной частей ареала самшитовой огневки (рис. 1*а*). Далее был устранен дисбаланс между нативной и инвазионной частями (рис. 1*б–д*). В результате было получено 3653 искусственных образца, которые вместе с выявленными действительными локусами дают 5232 точки в пространстве биоклиматических признаков. Назовем их искусственными положительными образцами или точками.

Генерация точек псевдо-отсутствия производилась в несколько этапов. Предварительно случайным образом равномерно генерировались точки в географическом пространстве в прямоугольнике с координатами от 30° з.д. до 180° в.д. и от 0 до 70° с.ш., включающем весь наблюдаемый ареал самшитовой огневки и захватывающем значительные территории вокруг него в Евразии и северной части Африки. Точки над океаном и морями отсеивались. Значения биоклиматических параметров для каждой сгенерированной точки псевдо-отсутствия рассчитывались с помощью кубической интерполяции.

На данном этапе встает вопрос о количестве генерируемых точек. Было предложено определить такое число точек, чтобы их плотность в пространстве стандартизированных значений биоклиматических признаков примерно равнялась плотности сгенерированных точек из оцененной климатической ниши вида, но была немного ее меньше, для возможности элиминировать точки

псевдо-отсутствия из предположительной области экологической ниши. Для оценки плотности точек над ними в виртуальном пространстве признаков производилась триангуляция Делоне (Скворцов, 2002). При этом значения биоклиматических признаков предварительно стандартизировались относительно значений их средних и стандартных отклонений множества сгенерированных положительных точек. Триангуляция осуществлялась при помощи функции Delaunay из пакета `scipy.spatial` для Python 3. За оценку плотности точек принималась средняя длина ребер полученных треугольников.

Был генерирован ряд наборов точек псевдо-отсутствия числом от 5 тыс. до 50 тыс. с шагом 5 тыс. точек. Было определено, что значение плотности точек в пространстве признаков, соответствующее указанному критерию, получалось при генерации 30 тыс. точек псевдо-отсутствия.

Очевидно, что сгенерированные таким методом точки будут находиться и в области пространства признаков, принадлежащей экологической нише вида. Таким образом, второй этап подготовки точек псевдо-отсутствия заключался в их элиминации из этой области на основе имеющегося набора положительных точек. Для достижения этой цели применялся другой известный алгоритм снижения дисбаланса между классами образцов — AllKNN, также реализованный в пакете Imbalanced-learn (Zhang, Mani, 2003; Liu et al., 2009). Этот алгоритм относится к типу понижающих (*undersampling*) алгоритмов, ликвидирующих дисбаланс за счет отбрасывания образцов мажоритарного класса на основе некоторых правил. Главный принцип работы данного алгоритма основывается на известном алгоритме “К ближайших соседей” (K Near Neighbors — KNN) и в общих чертах может быть описан следующим образом: для каждого образца класса, подлежащего фильтрации, определяется K ближайших соседей и, если среди них число образцов иного класса превышает половину, образец элиминируется.

Основным гиперпараметром этого алгоритма является число K ближайших соседей (KNN). Его определение представляет некоторую проблему и одновременно важность: при слишком низком числе KNN есть риск пропустить образцы, подлежащие элиминации, а при слишком большом, наоборот, отбросить те образцы, которые нужно сохранить. Для решения этой задачи был применен следующий подход. После действия алгоритмом AllKNN с некоторым

значением гиперпараметра KNN на набор образцов над полученным множеством проводилась триангуляция. Поскольку триангуляция в пространстве шести признаков занимает много времени и требует значительных вычислительных ресурсов, она производилась в пространстве первых четырех главных компонент, объясняющих примерно 93% дисперсии. Назовем стороны полученных треугольников связями. Средняя длина разнородных связей (сторон треугольников, соединяющих точки разных классов) служит показателем разделенности областей классов в пространстве признаков, а отношение их числа к общему числу связей наоборот – показатель смешанности, зашумленности данных. Трудность заключается в том, что при увеличении KNN оба эти значения изменяются в разных направлениях: доля разнородных связей уменьшается, а их средняя длина увеличивается. Требуется найти такое значение KNN, при котором будет достигнут некоторый баланс этих значений. Слишком большая средняя длина может быть признаком слишком большого расстояния между классами, что может привести к высокому уровню неопределенности при последующем классифицировании пространства признаков.

Анализ показал, что доля разнородных связей монотонно уменьшается при увеличении KNN. Однако их средняя длина изменяется по более сложной траектории. При KNN меньше 8 происходит резкое увеличение среднего расстояния. Далее следует спад с минимумом при значении KNN, равном 14, после чего средние значения длин разнородных связей растут. При KNN, равном 38, средняя длина опять немного уменьшается и выходит практически на плато с небольшим ростом при значениях KNN больше 62.

На основании этих результатов было предложено в качестве оптимального использовать значение KNN, равное 14, поскольку при нем наблюдается существенное уменьшение доли разнородных связей (т.е. уменьшение перемешанности точек разных классов или, иными словами, зашумленности данных) при минимальном значении их средних длин (т.е. минимальном зазоре между областями пространства признаков, относящихся к разным классам). Набор точек псевдо-отсутствия, прошедших воздействие алгоритма AllKNN при KNN, равном 14, был использован на дальнейших этапах исследования. Он включал 26741 точку псевдо-отсутствия.

Для ликвидации возникшего дисбаланса классов множество положительных образцов

было подвергнуто действию уже ранее использованного алгоритма SMOTE для достижения равенства числа точек обоих классов.

Окончательное моделирование экологической ниши

Для построения окончательной модели экологической ниши *C. perspectalis* в качестве алгоритма классификации был использован градиентный бустинг, отличающийся высокой эффективностью и широко применяющийся в настоящее время в самых разных областях (Mason et al., 1999). Суть этого метода заключается в создании последовательного ансамбля решающих регрессионных деревьев, каждое из которых уменьшает ошибку предыдущего ансамбля. Помимо высокой эффективности и относительной низкой требовательности к вычислительным ресурсам, такая структура алгоритма позволяет легко и понятным способом давать вероятностную оценку принадлежности оцениваемого образца к тому или иному классу, а также оценивать важность предикторов для классификации, основываясь на доле их использования для расщепления в узлах решающих деревьев (Рашка, Мирджалили, 2020).

Имеется несколько реализаций данного алгоритма, отличающихся в том числе разными подходами к решению проблемы переобучения. В данной работе использовался алгоритм, реализованный в библиотеке XGBoost (Chen, Guestrin, 2016), демонстрирующей одни из лучших показателей среди классических методов машинного обучения.

В качестве предикторов были взяты все шесть отобранных биоклиматических параметров. Для подбора гиперпараметров использовалась трехчастная кросс-валидация. Качество классификации оценивалось с помощью меры F1, сочетающей в себе возможность сбалансированной оценки точности и полноты классификации (Флах, 2016; Хейдт, Груздев, 2019). Набор данных, включающий положительные и отрицательные точки, был разбит случайным образом на обучающую и тестовую выборки, содержащие 70 и 30% образцов соответственно. Классификация на этапе обучения осуществлялась в дискретном режиме. Подбирались значения числа деревьев и их максимальной глубины. После подбора оптимальных значений этих гиперпараметров классификатора значение меры F1 на тестовом наборе составило 0.998. Далее классификатор с этими значениями гиперпараметров был

обучен на всем наборе образцов и сохранен для дальнейшего моделирования.

Для расчета евразийского климатического ареала самшитовой огневки на вход этого обученного классификатора в режиме предсказания подавался раннее вычисленный массив данных со значениями использованных шести биоклиматических параметров в центрах регулярной географической сетки с разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$, которые отражают климатическую ситуацию для 1999–2018 гг. Расчет производился в режиме как дискретного, так и вероятностного предсказания, позволяющего оценивать вероятность принадлежности географической точки к климатическому ареалу. Полученные результаты моделирования наносились на географическую карту.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены карты дискретной и вероятностной моделей современного евразийского климатического ареала самшитовой огневки с обозначенными локусами фактических находок. Как видно на этом рисунке, в Евразии имеется ряд областей, относительно которых нами не обнаружено опубликованных данных о распространении *C. perspectalis*, но которые могут стать или, возможно, уже стали частью ее ареала.

В нативной части климатического ареала самшитовой огневки (рис. 2б) таких областей меньше, чем в инвазионной, но все-таки они присутствуют. Это некоторые области в южной и восточной частях Китая и территория КНДР, где, согласно используемым сведениям, отсутствуют находки самшитовой огневки, однако вероятность их принадлежности к климатическому ареалу там очень велика. Впрочем, нельзя исключать возможность отсутствия или недоступности данных о распространении *C. perspectalis* на этих территориях. Интересные результаты получены для южных предгорий Гималаев. Как видно, область, пригодная для распространения самшитовой огневки, протянулась узким поясом от восточных районов Афганистана через Пакистан, Непал, Бутан, север и северо-восток Индии до границы с Китаем (рис. 2б). В этом регионе известно только два свидетельства о находках самшитовой огневки, которые, однако, сделаны в разных, противоположных, частях данной области: на западе — на территории современного Пакистана (Hampson, 1896), и на самом ее востоке — в Южном Китае (GBIF.org, 2020). Результаты моделирования говорят об отсутствии новых потенциальных

территорий для распространения *C. perspectalis* на Дальнем Востоке России, помимо уже идентифицированных, что может свидетельствовать о достижении здесь самшитовой огневкой пределов возможностей своего распространения (рис. 2б).

Как видно на рис. 2в, результаты моделирования инвазионной части климатического ареала самшитовой огневки свидетельствуют о заселении к настоящему моменту практически всей территории Западной Европы, относительно которой имеется основной массив сведений о распространении вредителя. При этом, как можно заметить, отсутствуют данные об его обнаружении в центральной и западной частях Ирландии и в значительной части Шотландии, хотя, по полученным модельным данным, эта территория обладает благоприятными для распространения самшитовой огневки климатическими условиями (рис. 2в). Полученная модель также показывает возможность распространения *C. perspectalis* на юге Скандинавского полуострова, и, несмотря на единичные данные об обнаружении вредителя в этом регионе, потенциальный ареал самшитовой огневки здесь гораздо обширнее. Также есть вероятность распространения *C. perspectalis* на севере Норвегии, хотя и с некоторой степенью неопределенности. Для этого региона имеется лишь одно сведение об обнаружении самшитовой огневки, но площадь ее климатического ареала здесь также намного больше. Очевидно, возможность распространения самшитовой огневки на этой территории обусловлена смягчающим действием теплого течения Гольфстрим. Также отмечена возможность распространения *C. perspectalis* в ряде регионов Южной Европы, где пока не было находок этого вида: на островах Сардиния, Пальма и Крит, а также в отдельных областях полуострова Пелопоннес в Греции (рис. 2в).

Стоит отметить, что локусы находок как минимум в двух местах на границе инвазионной части климатического ареала: на юго-западе (Мадрид, центр Испании) и на востоке (Вильнюс, восточная часть Литвы) — не вошли в модельный климатический ареал (рис. 2в), что может свидетельствовать либо о случайных заносах особей данного вида в эти районы, либо о наличии там небольших территорий с подходящим микроклиматом, поскольку микроклимат больших городов, как правило, отличается от климата окружающих областей (Lokoshchenko, 2014; Бардин, Платова, 2020; Марченко, 2022).

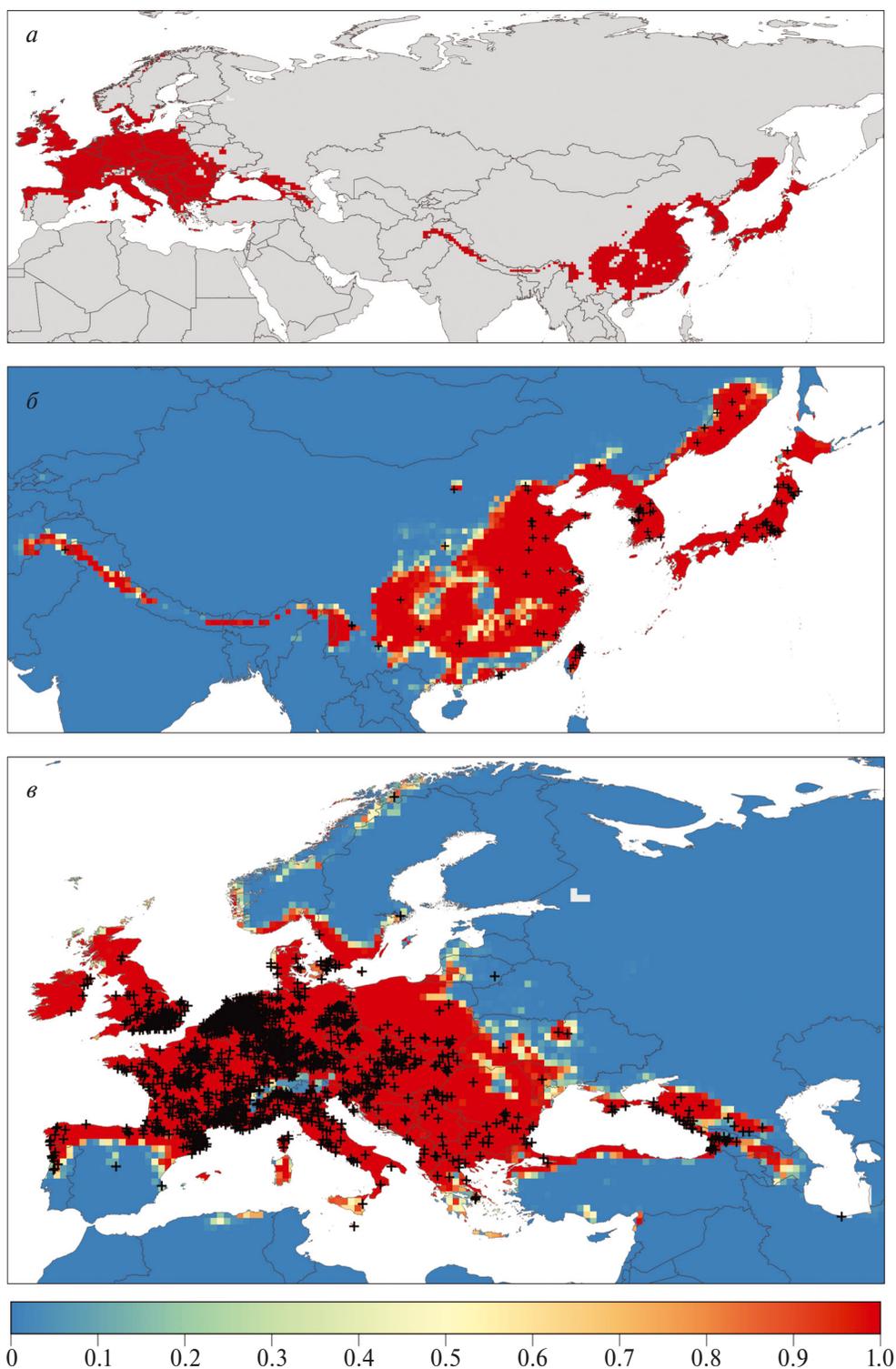


Рис. 2. Карты модельного евразийского климатического ареала *C. perspectalis*: *a* – карта дискретной модели климатического ареала (ареал отрисован красным цветом), *б* и *в* – карты вероятностной модели нативной и инвазионной частей климатического ареала соответственно. Внизу – шкала вероятности принадлежности территории к модельному климатическому ареалу. Символом “+” обозначены фактические точки обнаружения *C. perspectalis* в Евразии.

В Восточной Европе, согласно рис. 2в, климатические условия благоприятствуют распространению *C. perspectalis* практически на всей территории Польши. В статье Береса и соавт. (Bereś et al., 2022) дан обзор регионов и путей распространения самшитовой огневки в этой стране к 2020 г. Представленные в ней данные подтверждают результаты нашего моделирования, согласно которому климатический ареал *C. perspectalis* занимает почти всю территорию Польши. К этой части климатического ареала примыкает территория потенциального распространения самшитовой огневки в Калининградской области Российской Федерации и в восточных регионах Литвы. Обнаружение *C. perspectalis* в Польше на границе с этими областями Европы говорит о ее возможной инвазии в этом направлении, что согласуется с нашей моделью.

Большие территории возможного распространения самшитовой огневки находятся в Румынии, хотя данных об обнаружении здесь вредителя мало и все они относятся к приграничным областям страны. Также возможно распространение *C. perspectalis* в западных регионах Украины, на западном побережье Черного моря и на севере, в районе Киева, хотя в последнем случае мы наблюдаем локальный, очень “островной” характер модельного климатического ареала, что может свидетельствовать об очевидно краевом положении этой территории относительно остального ареала (рис. 2в). Информация о появлении в 2015 г. самшитовой огневки на черноморском побережье, в районе Одессы (Карпун и др., 2019), подтверждает правдоподобность полученных нами модельных результатов.

В европейской части Российской Федерации в область возможного распространения самшитовой огневки, помимо Калининградской области, где климатические условия благоприятны для ее инвазии, входит и ряд южных регионов. В Крыму распространение вредителя, согласно результатам проведенного моделирования, возможно по всей территории, хотя опубликованные данные говорят об обнаружении этого вида только в южных частях полуострова. Дальнейшее распространение *C. perspectalis* в Краснодарском крае и в кавказских регионах России, помимо уже заселенных вредителем областей, согласно полученной в данной работе модели, маловероятно. Инвазии самшитовой огневки могут также происходить и на северо-западном побережье Черного моря (рис. 2в).

Для Закавказья полученная модель свидетельствует о возможном распространении *C. perspectalis* в восточной части Азербайджана (рис. 2в), хотя к настоящему моменту данные об ее находках в этой стране неизвестны. Также возможно распространение самшитовой огневки в восточных областях Грузии, хотя имеющиеся сведения об обнаружении здесь самшитовой огневки касаются только западных областей страны.

Очень интересная ситуация наблюдается с возможной территорией распространения самшитовой огневки в Турции (рис. 2в). К настоящему моменту имеются в основном данные об обнаружении *C. perspectalis* только в северо-западной ее части – в Стамбуле и прилегающих к нему областях на азиатской стороне Босфора. Однако, согласно полученной модели, потенциальный ареал вредителя охватывает практически все черноморское побережье Турции, а также северную часть побережья Эгейского моря. Другая возможная область распространения – провинция Хатай на юго-востоке страны на границе с Сирией, являющаяся важным сельскохозяйственным регионом Турции. Недавно опубликованные данные по обнаружению самшитовой огневки в этом регионе соответствуют результатам нашего моделирования (Laz et al., 2022).

Анализ важности биоклиматических параметров для построения модели климатического ареала *C. perspectalis* показывает, что наибольшей важностью (47.6%) обладает сумма осадков самого сухого месяца (параметр BIO14). Далее по важности, хотя и значительно в меньшей степени (22.1%), следует средняя температура самого холодного квартала (BIO11), а на третьем месте, с небольшим отрывом от предыдущего параметра (18.6%), стоит сумма осадков самого теплого квартала (BIO18). Остальные три параметра (BIO2, BIO3, BIO15, см. табл. 1) в сумме имели важность 11.7%.

Также в ходе визуального анализа распределения точек обнаружения *C. perspectalis* в пространстве первых трех главных компонент отобранных биоклиматических факторов (рис. 1д) было обнаружено сильное различие эколого-климатических характеристик мест обитания самшитовой огневки в нативной и инвазионной частях ареала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как было отмечено во введении, на настоящий момент существует несколько методов одноклассовой классификации, которые

используются в моделировании распространения видов. В данной работе представлен метод, основанный на отсеивании точек псевдоотсутствия в области пространства признаков, где плотность положительных образцов превышает их плотность, с последующим классификационным разделением этого пространства с помощью обычного двухклассового метода классификации (в нашем случае – градиентного бустинга). В целом можно отметить удовлетворительное соответствие полученной модели и фактических данных о распространении *C. perspectalis*. Лишь для небольшого количества пространственных ячеек вероятность их принадлежности к ареалу ниже 90%, что говорит о малой степени неопределенности в полученной модели. В то же время общая картина полученного модельного ареала свидетельствует о низком уровне переобученности модели. Тем не менее имеет смысл дальнейшее исследование этого подхода, в том числе с использованием искусственно сгенерированных ареалов, с целью совершенствования разработанных методик.

Можно сравнить смоделированный в данной работе климатический ареал с результатами, представленными в статье Накамбо с соавт. (Nacambo et al., 2014). Часть потенциального модельного ареала, полученная этими авторами, совпадает с нашим модельным ареалом. Это в первую очередь прогнозируемая ими высокая вероятность появления самшитовой огневки в пока еще не заселенных ею районах своего нативного ареала – в Южной и Восточной Азии. Этими авторами также приводятся неопубликованные ранее сведения о находках *C. perspectalis* на территории южных островов Японии, что согласуется с результатами проведенного нами моделирования и выявлением здесь областей высокой вероятности распространения самшитовой огневки, хотя данные об обнаружении здесь вредителя не использовались в наших расчетах. Однако полученный авторами (Nacambo et al., 2014) модельный ареал также покрывает значительные территории в европейской и западно-сибирской частях России, а также территории стран Юго-Восточной Азии, где *C. perspectalis* не была обнаружена и которые отсутствуют в смоделированном в нашей работе климатическом ареале. При этом в модель Накамбо и соавт. (Nacambo et al., 2014) не вошла часть уже известного к настоящему времени европейского ареала – в Ирландии, Великобритании и Скандинавии. Можно сделать вывод о значительной смещенности

этой модели и ее способности к переоценке. Ограниченность доступных к моменту создания вышеуказанной публикации данных о фактическом распространении *C. perspectalis*, по-видимому, не позволила авторам (Nacambo et al., 2014) провести верификацию их модели и оценить эти ее недостатки.

Другая, более современная модель климатического ареала самшитовой огневки в Евразии представлена в публикации Канеллеса с соавт. (Canelles et al., 2021). Авторы применили для ее построения алгоритм MAXENT и опирались на более обширную базу данных о находках. Однако среди них практически отсутствуют данные об обнаружении *C. perspectalis* в России и в целом мало сведений о распространении в Восточной и Южной Европе. Также мало точек в нативной части ареала, в частности нет данных о находках на Дальнем Востоке России. Несмотря на эти недостатки, авторы (Canelles et al., 2021) создали намного более реалистичную модель, чем в работе Накамбо с соавт. (Nacambo et al., 2014). Сравнивая результаты этого исследования с построенной нами моделью, можно отметить большое сходство в смоделированном нативном ареале. Территории возможного распространения в Западной и Северной Европе в этих двух моделях также во многом совпадают. Однако, что касается климатического ареала в Южной и Восточной Европе, авторы (Canelles et al., 2021) явно недооценили возможность распространения там самшитовой огневки. Большие области юга Италии и Балканского полуострова представлены как имеющие низкую пригодность для распространения *C. perspectalis*. Также практически вся Восточная Европа в модельном ареале оказалась непригодной для обитания этого вредителя, за исключением причерноморских областей, в том числе Крыма, а также западных областей Кавказа. И это при том, что даже среди использованных авторами данных имеются сведения о находках *C. perspectalis* в этих регионах. Это говорит о значительной ошибке модели Канеллеса и соавт. (Canelles et al., 2021) и, к сожалению, является ее большим недостатком.

В проведенном нами исследовании было выявлено, что наибольшей значимостью для моделирования климатического ареала самшитовой огневки обладала сумма осадков самого сухого месяца (BIO14), в несколько меньшей степени – средняя температура самого холодного квартала (BIO11) и сумма осадков самого теплого квартала (BIO18), которые вместе обладали

важностью 88.3%, что может свидетельствовать о влиянии этих климатических факторов на жизнедеятельность и распространение *C. perspectalis*. Эти данные частично согласуются с выводами, сделанными в работе Канеллеса и др. (Canelles et al., 2021), где авторы при проведении эвристической оценки также отмечали наибольший вклад в построение климатической модели ареала *C. perspectalis* таких факторов, как количество осадков самого сухого квартала (BIO17) и минимальную температуру самого холодного месяца (BIO6), которые существенно коррелировали с отобранными нами параметрами (коэффициент линейной корреляции параметров BIO14 и BIO17 равен 0.975, BIO11 и BIO6 – 0.99). Однако эти же авторы (Canelles et al., 2021) далее по значимости ставят такие климатические факторы, как сезонность осадков (BIO15) и средний месячный разброс температур (BIO2), которые в наших оценках имели довольно низкую важность (в сумме с параметром BIO3 (изотермальность) – 11.7%). Это свидетельствует как об общности принципиальных выводов (сходство двух основных климатических факторов, имеющих наибольшую важность), так и о некоторых деталях различиях, обусловленных выбранными методиками и алгоритмами построения модели ареала. В дальнейшем эти результаты могут быть уточнены с помощью других инструментов, в том числе при натурных исследованиях.

Вопрос о возможности смещения или изменности (консерватизма) экологических ниш в ходе инвазий давно обсуждается в науке (Peterson, 1999, 2011; Graham, 2005; Feng et al., 2023). Имеется огромный объем литературы, посвященной изучению этой проблемы на примере разных видов. В частности, разработаны методы статистической оценки степени и достоверности различия экологических ниш (Warren et al., 2008; Brown, Carnaval, 2019; Eckert et al., 2020).

Как уже было отмечено, области распространения *C. perspectalis* в нативной и инвазионной частях ареала резко отличаются по анализируемым биоклиматическим факторам. На рис. 1d можно видеть, как в пространстве признаков соответствующие точки легко разделяются даже с помощью линейных методов классификации. Встает вопрос: в чем причина этого различия? Произошла ли реализация фундаментальной экологической ниши вида в тех условиях, которые отсутствовали в нативной части ареала, или же в ходе инвазии произошел сдвиг экологической ниши, обусловленный, например,

микроэволюционными процессами? Ответ на этот вопрос также требует дополнительных исследований, но на основании имеющихся сведений о характере инвазии самшитовой огневки в Европе, описанном во введении, можно предположить, что, скорее всего, имеет место реализация фундаментальной экологической ниши, иными словами, скрытых экологических возможностей вида. В пользу этого предположения говорит, например, стремительность распространения самшитовой огневки на новой территории, в совершенно новых климатических условиях, не встречающихся в пределах ее нативного ареала. Однако эти наблюдения и предположения требуют дополнительных экспериментальных и полевых исследований.

Полученные нами результаты свидетельствуют о достаточно высокой прогностической значимости созданной нами модели и могут быть использованы при разработке и проведении мероприятий, связанных с предотвращением появления вредителя на территориях, находящихся в группе риска по своим климатическим условиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы с использованием оригинального метода была построена модель эколого-климатической ниши самшитовой огневки *C. perspectalis* и отрисованы карты-схемы современного климатического ареала этого вида в Евразии. Показано, что достаточно обширные регионы Евразии подвержены риску дальнейшей инвазии самшитовой огневки. Дана оценка важности использованных эколого-климатических факторов для определения территории распространения самшитовой огневки и показано, что для моделирования климатического ареала наибольшую значимость имеет влажностный фактор (сумма осадков самого сухого месяца). Обнаружено существенное различие эколого-климатических ниш в инвазионной и нативной частях ареала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за труд по прочтению рукописи данной статьи и за ряд ценных замечаний, несомненно, улучшивших ее качество.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование потенциально возможного расширения ареала самшитовой огневки на территории Евразии

выполнено в рамках Государственного задания Института географии РАН “Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования” FMWS-2024-0007, № 1021051703468-8. Анализ климатических факторов, влияющих на ее распространение, выполнен за счет средств темы “3.2. Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга” плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг., утвержденного приказом № 745 от 31.12.2019.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М.Ю., Платова Т.В., 2020. Изменения сезонных показателей экстремумов температуры воздуха в Москве и центральных областях европейской части России // Метеорология и гидрология. № 7. С. 20–35.
- Богданович А.Ю., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Баранчиков Ю.Н., Липка О.Н., Семенов С.М., 2023. Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца XX века и XXI века // Фунд. и прикл. климатология. Т. 9. № 1. С. 65–88. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-65-106>
- Будашкин Ю.И., 2016. Самшитовая огневка – *Cydalima perspectalis* (Lepidoptera, Rhyacioniidae) – новый для фауны Украины и Крыма вид опасного вредителя лесного и паркового хозяйства // Экосистемы. Вып. 5. С. 36–39.
- Гниненко Ю.И., Пономарев В.Л., Нестеренкова А.Э., Сергеева Ю.А., Ширяева Н.В., Лянгузов М.Е., 2018. Самшитовая огневка *Neoglyphodes perspectalis* Walker – новый опасный вредитель самшита на юге европейской части России. Пушкино: ВНИИЛМ. 36 с.
- Гниненко Ю.И., Сергеева Ю.А., Ширяева Н.В., Лянгузов М.Е., 2016. Самшитовая огневка – опасный инвазивный вредитель самшита // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. № 3. С. 25–35.
- Гниненко Ю.И., Ширяева Н.В., Щуров В.И., 2014. Самшитовая огневка – новый инвазивный организм в лесах российского Кавказа // Карантин растений. № 1 (7). С. 32–36.
- Добронос В.В., 2017. Новые данные о самшитовой огневке *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) на Центральном Кавказе. <https://aeconomy.ru/news/agro/novy-e-dannye-o-samshitovoy-ognevke.html>
- Ескин Н.Б., Бибин А.Р., 2014. Очаг самшитовой огневки в тисо-самшитовой роще // Кавказ заповедный. № 8 (124). С. 7.
- Карпун Н.Н., Пономарев В.Л., Нестеренкова А.Э., Захарченко В.Е., 2019. Инвазия и биология самшитовой огневки *Cydalima perspectalis* Walker (Lepidoptera, Crambidae) на Черноморском побережье России // Фитосанитария. Карантин растений. Т. 29. № 3. С. 50–59.
- Лукмазова Е.А., 2014. Распространение опасных вредителей для самшитовых насаждений на территории Республики Абхазия // VIII Чтения памяти О.А. Катаева. Вредители и болезни древесных растений России: Мат-лы междунар. конф., Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2014 г. / Под ред. Мусолина Д.Л., Селиховкина А.В. СПб.: СПбГЛТУ. С. 45.
- Марченко А.Б., 2022. Екологічні аспекти прояву інвазійного виду *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) в урбанізованих екосистемах // Агробіологія. № 2. С. 153–160. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-174-2-153-160>
- Нестеренкова А.Э., Пономарев В.Л., Карпун Н.Н., 2017. Особенности развития самшитовой огневки в лабораторной культуре // Лесной вестник. Т. 21. № 3. С. 61–69. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-3-61-69>
- Определитель насекомых Дальнего Востока России, 2005. Т. V. Ручейники и чешуекрылые. Ч. 5 / Под ред. Лера П.А. Владивосток: Дальнаука. 575 с.
- 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 // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXV. М.: ИГКЭ. С. 177–206.
- Попова Е.Н., Попов И.О., 2019. Моделирование потенциальных климатических ареалов биологических видов и их климатогенных изменений // Фунд. и прикл. климатология. Т. 1. С. 58–75. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2019-1-58-75>
- Попова Е.Н., Попов И.О., 2023. Локусы обнаружения самшитовой огневки *Cydalima perspectalis* в мире в 1986–2020 гг. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620218 Российская Федерация. Заявка № 2023620033; заявл. 10.01.2023; опубл. 16.01.2023 / Заявитель: ФГБУН Институт географии РАН. <https://elibrary.ru/item.asp?id=50131740>
- Проклов В.В., Караева С.З., 2013. Новые и интересные находки чешуекрылых (Lepidoptera) в Чеченской Республике (Россия) // Кавказский энтомолог. бюлл. Т. 9. № 2. С. 281–282.

- Рашка С., Мирджалили В., 2020. Python и машинное обучение. Машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2. М.; СПб.: Диалектика. 846 с.
- Скворцов А.В., 2002. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томского ун-та. 128 с.
- Стрюкова Н.М., 2016. Аборигенные и инвазивные членистоногие и их естественные враги в парках Республики Крым // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. Т. 142. Ялта: ГНБС. С. 186–193.
- Трикоз Н.Н., Халилова З.Э., 2016. Самшитовая огневка в Никитском Ботаническом саду // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. Т. 142. Ялта: ГНБС. С. 69–75.
- Флах П., 2016. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: Изд-во ДМК. 399 с.
- Хейдт М., Груздев А., 2019. Изучаем Pandas. М.: Изд-во ДМК. 679 с.
- Щуров В.И., 2014. Самшитовая огневка *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) на российском Кавказе – хроника трех лет инвазии // VIII Чтения памяти О.А. Катаева. Вредители и болезни древесных растений России: Мат-лы междунар. конф., Санкт-Петербург, 18–20 ноября 2014 г. / Под ред. Мусолина Д.Л., Селиховкина А.В. СПб.: СПбГЛТУ. С. 99–100.
- Araújo M.B., Anderson R.P., Barbosa M.A., Beale C.M., Dormann C.F., et al., 2019. Standards for distribution models in biodiversity assessments // Sci. Adv. V. 5. Art. eaat4858. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4858>
- Atlas of Woody Plants in China. Distribution and Climate, 2011 / Eds Fang J., Wang Z., Tang Z. Berlin, Heidelberg: Springer. 2000 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15017-3>
- Barandela R., Sánchez J.S., Garca V., Rangel E., 2003. Strategies for learning in class imbalance problems // Pattern Recognit. V. 36. № 3. P. 849–851. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00257-1)
- Barbet-Massin M., Jiguet F., Albert C.H., Thuiller W., 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? // Methods Ecol. Evol. V. 2. № 3. P. 327–338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Bellard C., Thuiller W., Leroy B., Genovesi P., Bakkenes M., Courchamp F., 2013. Will climate change promote future invasions? // Global Change Biol. V. 12. № 19. P. 3740–3748. <https://doi.org/10.1111/gcb.12344>
- Bereś P.K., Ziętara P., Nakonieczny M., Kontowski Ł., Grzbiela M., Augustyniak M., 2022. *Cydalima perspectalis* in Poland – 8 years of invasion against the background of three other invasive species // Diversity. V. 22. № 14. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/d14010022>
- Billen W., 2007. *Diaphania perspectalis* (Lepidoptera: Pyralidae) – a new moth in Europe // Mitt. Entomol. Ges. Basel. V. 57. P. 135–137.
- Booth T.H., Nix H.A., Busby J.R., Hutchinson M.F., 2014. BIOCLIM: The first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies // Divers. Distrib. V. 20. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Bras A., Avtzis D.N., Kenis M., Li H., Véték G., et al., 2019. A complex invasion story underlies the fast spread of the invasive box tree moth (*Cydalima perspectalis*) across Europe // J. Pest Sci. № 92. P. 1187–1202. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01111-x>
- Brown J.L., Carnaval A.C., 2019. A tale of two niches: Methods, concepts, and evolution // Front. Biogeogr. V. 11. № 4. Art. e44158. <https://doi.org/10.21425/F5FBG44158>
- Canelles Q., Bassols E., Vayreda J., Brotons L., 2021. Predicting the potential distribution and forest impact of the invasive species *Cydalima perspectalis* in Europe // Ecol. Evol. V. 10. № 11. P. 5713–5727. <https://doi.org/10.1002/ece3.7476>
- Carpenter G., Gillison A.N., Winter J., 1993. DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals // Biodivers. Conserv. V. 2. P. 667–680. <https://doi.org/10.1007/BF00051966>
- Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O., Kegelmeyer P.W., 2002. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique // J. Artif. Intell. Res. V. 16. P. 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
- Chen T., Guestrin C., 2016. XGBoost: a scalable tree boosting system // Proc. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. N.-Y.: Association for Computing Machinery. P. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Di Domenico F., Lucchese F., Magri D., 2011. Late glacial and Holocene history of *Buxus sempervirens* L. in Italy // Annali di Botanica. V. 1. P. 45–58.
- Di Domenico F., Lucchese F., Magri D., 2012. *Buxus* in Europe: Late Quaternary dynamics and modern vulnerability // Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst. V. 14. P. 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2012.07.001>
- Drake J.M., Bossenbroek J.M., 2004. The potential distribution of zebra mussels in the United States // Bioscience. V. 10. № 54. P. 931–941. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0931:TPDOZM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0931:TPDOZM]2.0.CO;2)
- Eckert S., Hamad A., Kilawe C.J., Linders T.E.W., et al., 2020. Niche change analysis as a tool to inform management of two invasive species in Eastern Africa // Ecosphere. V. 11. № 2. Art. e02987. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2987>

- Esmailnezhad K., Mehrjerdi M., Ghorbanzadeh M.*, 2020. Genetic diversity and structure of *Buxus hyrcana* (Po-jark) populations in the Caspian forests of northern Iran revealed by ISSR markers // *Biologia*. V. 75. № 2. P. 917–926.
<https://doi.org/10.2478/s11756-020-00445-7>
- Feldtrauer J.F., Feldtrauer J.J., Brua C.*, 2009. Premiers signalements en France de la Pyrale du Buis *Diaphania perspectalis* (Walker, 1859), espèce exotique envahissante s'attaquant aux Buis (Lepidoptera, Crambidae) // *Bull. Soc. Entomol. Mulhouse*. V. 65. P. 55–58.
- Feng L., Zhou L., Zhang T., Wang X.*, 2023. Niche dynamics below the species level: Evidence from evaluating niche shifts within *Quercus aquifolioides* // *Forests*. V. 690. № 14. P. 1–14.
<https://doi.org/10.3390/f14040690>
- Fick S., Hijmans R.*, 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *Int. J. Climatol.* V. 37. № 12. P. 4302–4315.
<https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Franklin J.*, 2009. Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 320 p.
- Gaston K.J.*, 2003. The Structure and Dynamics of Geographic Ranges. Oxford: Oxford Univ. Press. 266 p.
- GBIF.org, 2020. (4 August 2020) GBIF Occurrence Download.
<https://doi.org/10.15468/dl.prq93v>
- Graham C.*, 2005. Niche conservatism: Integrating evolution, ecology, and conservation biology // *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* V. 36. P. 519–539.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102803.095431>
- Guo Q., Kelly M., Graham C.H.*, 2005. Support vector machines for predicting distribution of Sudden Oak Death in California // *Ecol. Model.* V. 182. № 1. P. 75–90.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.012>
- Hampson G.F.*, 1896. The Fauna of British India, Including Ceylon and Burma. Moths. V. III. L.: Taylor & Francis. 546 p.
- Hanberry B., He H., Palik B.*, 2012. Pseudoabsence generation strategies for species distribution models // *PloS One*. V. 7. № 8. Art. e444486.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044486>
- Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D.*, 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // *Sci. Data*. V. 7. Art. 109.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hughes L., Cawsey E.M., Westoby M.*, 1996. Geographic and climatic range sizes of Australian eucalypts and a test of Rapoport's rule // *Global Ecol. Biogeogr. Lett.* V. 5. № 3. P. 128–142.
<https://doi.org/10.2307/2997395>
- Inoue H., Sugi S., Kuroko H., Moriuti S., Kawabe A., Owada M.*, 1982. Pyralidae. Moths of Japan. Tokyo: Kodansha. 1519 p.
- Kenis M., Nacambo S., Leuthardt F.L.G., Di Domenico F., Hays T.*, 2013. The box tree moth, *Cydalima perspectalis*, in Europe: Horticultural pest or environmental disaster? // *Aliens*. V. 33. P. 38–41.
- Krüger E.O.*, 2008. *Glyphodes perspectalis* (Walker, 1859) – neu für die Fauna Europas (Lepidoptera: Crambidae) // *Entomol. Zeitschrift*. V. 118. № 2. P. 81–83.
- Laz B., Ok T., Kocaçınar F.*, 2022. İstilacı Şimşir Güvesi (*Cydalima perspectalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae, Spilomelinae)'nin Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesinde Uzun Yapraklı Şimşir (*Buxus balearica*) Türü Üzerindeki Zararına İlişkin İlk Tespitler // *ArtGRID*. V. 4. № 2. P. 151–159.
<https://doi.org/10.57165/artgrid.1178575>
- Lemaître G., Nogueira F., Aridas C.K.*, 2017. Imbalanced-learn: A Python toolbox to tackle the curse of imbalanced datasets in machine learning // *J. Mach. Learn. Res.* V. 18. № 17. P. 1–5.
- Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H.*, 2008. Isolation forest // 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy. Los Alamitos: IEEE. P. 413–422.
<https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17>
- Liu X.-Y., Wu J., Zhou Z.-H.*, 2009. Exploratory under-sampling for class-imbalance learning // *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B. Cybern.* V. 39. № 2. P. 539–550.
<https://doi.org/10.1109/TSMCB.2008.2007853>
- Lokoshchenko M.A.*, 2014. Urban 'heat island' in Moscow // *Urban Climate*. V. 10. Pt 3. P. 550–562.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
- Mack B., Roscher R., Waske B.*, 2014. Can I trust my one-class classification? // *Remote Sensing*. V. 6. № 9. P. 8779–8802.
<https://doi.org/10.3390/rs6098779>
- Mally R., Nuss M.*, 2010. Phylogeny and nomenclature of the box tree moth, *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) comb. n., which was recently introduced into Europe (Lepidoptera: Pyraloidea: Crambidae: Spilomelinae) // *Eur. J. Entomol.* V. 107. № 3. P. 393–400.
<https://doi.org/10.14411/eje.2010.048>
- Maruyama T., Shinkaji N.*, 1991. The life cycle of the box-tree pyralid, *Glyphodes perspectalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) // *Japanese J. Appl. Entomol. Zool.* V. 35. № 3. P. 221–230.
<https://doi.org/10.1303/jjaez.35.221>
- Mason L., Baxter J., Bartlett P.L., Freen M.*, 1999. Boosting algorithms as gradient descent // *Advances in Neural Information Processing Systems*. V. 12 / Eds Solla S., Leen T., Müller K. Cambridge: MIT Press. P. 512–518.
- Mateo R., Croat T., Felicísimo A., Muñoz J.*, 2010. Profile or group discriminative techniques? Generating reliable species distribution models using pseudo-absences and target-group absences from natural history collections // *Divers. Distrib.* V. 16. № 1. P. 84–94.
<https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2009.00617.x>

- Matsiakh I., Kramarets V., Mamadashvili G.*, 2018. Box tree moth *Cydalima perspectalis* as a threat to the native populations of *Buxus colchica* in Republic of Georgia // *J. Entomol. Res. Soc.* V. 20. № 2. P. 29–42.
- Min T., Brückner P.*, 2008. Buxaceae // *Flora of China*. V. 11. Beijing: Science Press & St. Louis: Missouri Botanical Garden Press. P. 321–332.
- Mitchell R., Chitanava S., Dbar R., Kramarets V., Lehtijärvi A., et al.*, 2018. Identifying the ecological and societal consequences of a decline in *Buxus* forests in Europe and the Caucasus // *Biol. Invasions*. V. 20. P. 3605–3620.
<https://doi.org/10.1007/s10530-018-1799-8>
- Muus T.S.T., Haafte E.-J., van, Deventer L.J., van*, 2009. De buxusmot *Palpita perspectalis* (Walker) in Nederland (Lepidoptera: Crambidae) // *Entomol. Berichten*. V. 69. P. 66–67.
- Nacambo S., Leuthardt F.L., Wan H., Li H., Hays T., et al.*, 2014. Development characteristics of the box tree moth *Cydalima perspectalis* and its potential distribution in Europe // *J. Appl. Entomol.* V. 138. № 1–2. P. 14–26.
<https://doi.org/10.1111/jen.12078>
- Noumir Z., Honeine P., Richard C.*, 2012. On simple one-class classification methods // *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*. Cambridge: IEEE. P. 2022–2026.
<https://doi.org/10.1109/ISIT.2012.6283685>
- Peterson A.*, 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time // *Science*. V. 285. № 5431. P. 1265–1267.
<https://doi.org/10.1126/science.285.5431.1265>
- Peterson A.*, 2011. Ecological niche conservatism: A time-structured review of evidence // *J. Biogeogr.* V. 38. № 5. P. 817–827.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02456.x>
- Peterson A.T.*, 2014. Mapping Disease Transmission Risk. Enriching Models Using Biogeography and Ecology. Baltimore: John Hopkins Univ. Press. 210 p.
<https://doi.org/10.3201/eid2108.150665>
- Peterson A.T., Soberón J., Pearson R.G., Anderson R.P., Martínez-Meyer E., et al.*, 2011. Ecological Niches and Geographic Distributions. Princeton; Oxford: Princeton Univ. Press. 314 p.
<https://doi.org/10.1515/9781400840670>
- Petrosyan V., Osipov F., Feniova I., Dergunova N., Warshavsky A., et al.*, 2023. The TOP-100 most dangerous invasive alien species in Northern Eurasia: Invasion trends and species distribution modelling // *NeoBiota*. V. 82. P. 23–56.
<https://doi.org/10.3897/neobiota.82.96282>
- Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E.*, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecol. Model.* V. 190. № 3–4. P. 231–259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips S., Dudík M., Schapire R.E.*, 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling // *ICML '04: Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. N.-Y.: Association for Computing Machinery. P. 83.
<https://doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- PictureThis, 2023. Online Plant Encyclopedia and Common Popular Plants. <https://www.picturethisai.com/wiki>
- Radosavljevic A., Anderson R.P.*, 2014. Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation // *J. Biogeogr.* V. 41. P. 629–643.
<https://doi.org/10.1111/jbi.12227>
- Senay S.D., Worner S.P., Ikeda T.*, 2013. Novel three-step pseudo-absence selection technique for improved species distribution modelling // *PloS One*. V. 8. № 8. Art. e71218.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071218>
- Sillero N., Arenas-Castro S., Enriquez-Urzelai U., Vale C.G., Sousa-Guedes D., et al.*, 2021. Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling // *Ecol. Model.* V. 456. № 15. Art. 109671.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109671>
- Slamka F.*, 2022. Pyraloidea (Lepidoptera) of Central Europe: Identification, Distribution, Habitat, Biology. Iver: Pemberley Natural History Books BA, ABA. 176 p.
- Soberón J.*, 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species // *Ecol. Lett.* V. 10. № 12. P. 1115–1123.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- Srivastava V., Lafond V., Griess V.C.*, 2019. Species distribution models (SDM): Applications, benefits and challenges in invasive species management // *CABI Rev.* V. 14. № 20. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914020>
- Stoica A.*, 2018. An interpretation of multi-model future climate predictions for BIOCLIM variables in Romania // *Contribuții Botanice*. V. 53. P. 89–109.
- Wan H., Hays T., Kenis M., Nacambo S., Xu H., et al.*, 2014. Biology and natural enemies of *Cydalima perspectalis* in Asia: Is there biological control potential in Europe? // *J. Appl. Entomol.* V. 138. № 10. P. 715–722.
<https://doi.org/10.1111/jen.12132>
- Wang S., Liu Q., Zhu E., Porikli F., Yin J.*, 2018. Hyperparameter selection of one-class support vector machine by self-adaptive data shifting // *Pattern Recognit.* V. 74. P. 198–211.
<https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.09.012>
- Wang X., Jiang Y., Wu W., He X., Wang Z. et al.*, 2023a. Cryptosporidiosis threat under climate change in China: Prediction and validation of habitat suitability and outbreak risk for human-derived *Cryptosporidium* based on ecological niche models // *Infect. Dis. Poverty*. V. 12. № 35. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1186/s40249-023-01085-0>
- Wang X., Xu Q., Liu J.*, 2023b. Determining representative pseudo-absences for invasive plant distribution modeling based on geographic similarity // *Front. Ecol. Evol.* V. 11. Art. 1193602.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1193602>

- Warren D.L., Glor R.E., Turelli M., 2008. Environmental niche equivalency versus conservatism: Quantitative approaches to niche evolution // *Evolution*. V. 62. № 11. P. 2868–2883.
<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2008.00482.x>
- Wisz M.S., Guisan A., 2009. Do pseudo-absence selection strategies influence species distribution models and their predictions? An information-theoretic approach based on simulated data // *BMC Ecol.* V. 9. Art. 8.
<https://doi.org/10.1186/1472-6785-9-8>
- Xie C., Chen L., Li M., Liu D., Jim C.Y., 2023. Spatial–temporal distribution pattern of *Ormosia hosiei* in Sichuan under different climate scenarios // *Forests*. V. 14. № 6. Art. 1261.
<https://doi.org/10.3390/f14061261>
- Zhang H., Zheng S., Huang T., Liu J., Yue J., 2023. Estimation of potential suitable habitats for the relict plant *Euptelea pleiosperma* in China via comparison of three niche models // *Sustainability*. V. 15. № 14. Art. 11035.
<https://doi.org/10.3390/su151411035>
- Zhang J.P., Mani I., 2003. KNN approach to unbalanced data distributions: A case study involving information extraction // *Proc. Int. Conf. on Machine Learning (ICML 2003)*. Workshop on Learning from Imbalanced Data Sets. Washington: ICML. P. 1–7.
- Zurell D., Franklin J., König C., Bouchet P.J., Dormann C.F., et al., 2020. A standard protocol for reporting species distribution models // *Ecography*. V. 43. № 9. P. 1261–1277.
<https://doi.org/10.1111/ecog.04960>

Modeling of the modern climatic range of *Cydalima perspectalis* (Lepidoptera, Crambidae) in Eurasia

I. O. Popov^{a, b, *}, E. N. Popova^{b, **}

^a*Izrael Institute of Global Climate and Ecology
 Glebovskaya str., 20B, Moscow, 107258 Russia*

^b*Institute of Geography, RAS
 Staromonetny Lane, 29/4, Moscow, 119017 Russia*

*E-mail: igor_o_popov@mail.ru

**E-mail: en_popova@mail.ru

Modeling of the modern climatic range of a dangerous plant pest of the genus *Buxus* L. box tree moth *Cydalima perspectalis* (Walker, 1859) is carried out in order to determine possible territories of its further expansion in Eurasia. Information on the loci of actual *C. perspectalis* detection both in native (East and South Asia) and invasive (Europe and West Asia) parts of the range was collected from various sources (species distribution databases and publications). Six bioclimatic (three temperature and three humidity) parameters are used as distribution predictors. Original methods for determining the number of pseudo-absence points and their selective generation are developed and applied. The final classification and partitioning of the space of bioclimatic factors is carried out using gradient boosting. The modern Eurasian climatic range of the box tree moth is calculated and mapped. It is shown that the invasion has not yet reached its limits and there are a number of territories in Eurasia where climatic conditions are favorable for the emergence of *C. perspectalis* populations both in the native part of the range (certain southern and eastern regions of China, the DPRK, the southern foothills of the Himalayas) and in its invasive part (Northern and Eastern Europe, Caucasus, and Turkey). A comparative assessment of the importance of different climatic factors in determining the box tree moth distribution area is given. It has been found out that the sum of the driest month precipitation is of greatest importance for constructing a model of the *C. perspectalis* climatic range (47.6%). A significant difference in climatic conditions between the native and invasive parts of the range is revealed and assumptions about the possible causes of its occurrence are made.