

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО АРЕАЛА ЯСЕНЕВОЙ УЗКОТЕЛОЙ ЗЛАТКИ *AGRILUS PLANIPENNIS* FAIRMAIRE (COLEOPTERA: BUPRESTIDAE) В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

© 2024 Баранчиков Ю.Н.^{а, *}, Добролюбов Н.Ю.^{б, **}, Семенов С.М.^{б, ***}

^а Институт леса им. В.Н. Сукачёва ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

^б Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, 107258, Россия
e-mail: *baranchikov_yuri@yahoo.com; **dobronik@yandex.ru; ***SergeySemenov1@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.07.2024. После доработки 16.08.2024. Принята к публикации 25.08.2024

Климатический ареал вида – совокупность точек географического пространства, в которых климат допускает устойчивое существование популяций вида при благоприятном сочетании остальных факторов динамики численности. Для Северного полушария с помощью специальной совокупности климатических предикторов рассчитан климатический ареал ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* (ЯУЗ) – опасного инвазионного вредителя ясеневых насаждений. Расчёты проводились для климатов 1990–1999 гг., 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. в условиях сценария SSP7.0, описывающего достаточно умеренное антропогенное воздействие на климат. Построены карты-схемы, на которых также обозначены современные зоны распространения ЯУЗ. В Северной Америке она заселила почти две трети своего климатического ареала. Нет оснований полагать, что эта экспансия будет остановлена. В первичной зоне распространения вида – в Восточной Азии – и в Европе климатический ареал также не освоен полностью. Дальнейшая экспансия ЯУЗ в её первичной зоне распространения ожидается незначительной из-за сдерживания всем комплексом биологических факторов – коэволюционных ограничителей её численности. Напротив, в Европе вид сможет дойти до атлантического побережья, поскольку такие ограничители там либо отсутствуют, либо только формируются. Как показывают расчёты, при дальнейшем изменении глобального климата доминирующей тенденцией будет продвижение северных границ климатического ареала ЯУЗ на север. При этом на территории России ожидается также его расширение в азиатскую часть, в Сибирь, вдоль широтной полосы в интервале широт 50–60° с пригодным для *A. planipennis* климатом. Уже в 2030–2039 гг. в восточном направлении эта полоса достигнет Красноярского края и далее будет распространяться к востоку. Поэтому при устройстве искусственных насаждений ясеня в этой области целесообразно не использовать неустойчивые к этому вредителю виды ясеня.

Ключевые слова: ясеневая изумрудная узкотелая златка, *Agrilus planipennis*, климатический ареал, Евразия, Северная Америка, изменения климата, сдвиг границ ареала.

DOI:10.35885/1996-1499-17-3-014-026

Введение

В век глобализации инвазионные виды являются одной из значительных угроз биоразнообразию и функционированию лесных экосистем [Brockhoff, Liebhold, 2017; Seidl et al., 2018; Invasive..., 2021]. Они часто служат источником огромных экономических потерь, связанных как непосредственно с причинённым вредом, так и с мероприятиями по их контролю и профилактике. Примером подобного вида-инвайдера может служить восточноазиатский жук ясеневая изумрудная узкотелая златка *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: BUPRESTIDAE), далее ЯУЗ.

В своём первичном ареале в Восточной Азии (восточный Китай, Корейский полуостров, Япония и юг российского Дальнего Востока) ЯУЗ не причиняет существенного ущерба местным видам растений-хозяев: ясеням манчжурскому *Fraxinus manchshurica* Rupr. и китайскому *F. chinensis* Roxb. Эти ясени достаточно устойчивы к данному вредителю. Однако, в этом регионе, например, в Китае, ЯУЗ даёт вспышки массового размножения на плантациях и в городских посадках интродуцированных североамериканских ясеней, в первую очередь ясеня пенсильванского *F. pennsylvanica* Marshall. До 1999 г. эти

очаги были сосредоточены в основном на территориях южнее провинции Цзилинь, но в настоящее время они занимают обе северо-восточные провинции Цзилинь и Хейлунцзян [Dang et al., 2022].

Вторичный ареал *A. planipennis* занимает к настоящему времени огромные территории Северной Америки и Восточной Европы [Sun et al., 2024]. В этих частях света, согласно дендрохронологическим датировкам, вид появился практически одновременно в начале 1990-х [Siegert et al., 2014; Баранчиков и др., 2016]. Он был официально обнаружен в 2002 г. в США (Детройт, Мичиган) и в 2003 г. в России (Москва) [Haack et al., 2015].

В Северной Америке к 2024 г. вредитель уничтожил или сильно повредил насаждения из доминирующих видов ясеней *Fraxinus americana* L., *F. pennsylvanica*, *F. nigra* Marshall, *F. quadrangulata* Michx., *F. profunda* Bush. и других [Anulewicz et al., 2008] в 36 штатах США и шести провинциях Канады [Sun et al., 2024; CFIA, 2024]. Ежегодные потери от ЯУЗ в США превысили 1.6 млрд долларов, при этом потери промышленной древесины составили менее 1% от этой суммы. Основной урон нанесён бюджетам отдельных штатов; выросла стоимость проживания и упала цена недвижимости в районах с погибшими ясенями [Aukema et al., 2011].

В Европе к настоящему времени пострадали насаждения из интродуцированного *F. pennsylvanica* и местного *F. excelsior* L. в 21 субъекте Российской Федерации и минимум в трёх областях Украины [Баранчиков, Пономарёв, 2024]. В России потери от ЯУЗ приводятся лишь для Москвы (только объекты уличного и паркового озеленения без придомовых посадок) и Санкт-Петербурга. Они составили, соответственно, 17 млрд руб. за период с 2008 по 2014 г. [Гниненко, Клюкин, 2016] и 270 млн рублей за 2020–2022 гг. [Селиховкин и др., 2023]. При этом принципы расчётов различны и результаты порой приблизительны [Kirichenko et al., 2021].

Златка внесена в карантинные списки большинства стран Северного полушария [EPPO, 2013; EFSA, 2020]. В США, несмотря на значительные достижения в изучении этого вида и усилия по сдерживанию его

распространения, внутренний федеральный карантин к настоящему времени отменён в связи с бесперспективностью. Вредитель распространился от восточного побережья до центра страны, а очаги отдельных «десантов» были обнаружены в 2022 г. на западном побережье США, в Орегоне [Emerald Ash Borer Information, 2024; Maze et al., 2024]. В Европе вторичный ареал *A. planipennis* простирается от Волги до Днепра [Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a; Баранчиков, Пономарёв, 2024] и, расширяясь со скоростью 12–40 км/год [Straw et al., 2013], вскоре может достичь побережья Атлантики [Evans et al., 2020]. Продвижению вредителя способствует не только наличие неустойчивого к заражению растения-хозяина [Gougherty, Davies, 2022], но и особенности климата и его изменения.

В связи с этим важно выявить климатически благоприятные зоны для распространения ЯУЗ и их изменения при разных сценариях изменения климата. Такие исследования проводились как на региональном уровне [Sobek-Swant et al., 2012; Flø et al., 2015; Valenta et al., 2015; Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2018; Dang et al., 2021; Barker et al., 2023; Meshkova et al., 2023], так и для европейской части континента Евразия [Rossi et al., 2024].

В настоящей статье нами впервые сделана попытка выявить климатический ареал *A. planipennis* и его возможные изменения в будущем в условиях меняющегося климата в Северном полушарии в целом.

Материал и методика

В контексте глобального распространения фитофагов безусловно важны географические барьеры: океаны, горы, пустыни и пр. [Francic et al., 2023]. Однако в современных условиях, при многократно возросшей интенсивности перевозок на большие расстояния внутри континентов и между континентами, человек невольно способствует преодолению этих барьеров. Наиболее важными факторами являются наличие кормовых растений и климатические условия. Среди климатических факторов градиенты температурных параметров часто оказываются более важными для формирования ареалов насекомых-фи-

тофагов, чем градиенты параметров осадков [Chesters et al., 2019].

Потепление климата приводит к ограничению развития златок рода *Agrilus* одним сезоном вместо двух [Duan et al., 2021] и продвижению границ вторичного ареала к северу при наличии там видов кормовых растений [Reed et al., 2018]. Южная граница также может сдвинуться к северу, если зимние температуры не позволят продлить холодный период для успешного прохождения облигатной диапаузы личинок [Fick, MacQuarrie, 2018; Duan et al., 2021]. Помимо прочего, изменение климата может повлиять на видовой состав и эффективность комплекса паразитоидов ЯУЗ [Gould et al., 2020; Duan et al., 2021].

Таким образом, климат многообразно влияет на развитие *A. planipennis* на разных фазах онтогенеза и на ее экологическое взаимодействие с другими видами. Так, например, в работе [Barker et al., 2023] приведены весьма детальные данные о влиянии гидрометеорологических факторов на развитие ЯУЗ. Однако такой подход пока не может применяться для оценок ареалов в континентальном и глобальном масштабе. Ведь надёжных гидрометеорологических данных суточного и большего разрешения в таком масштабе не имеется, в особенности в отношении будущих климатов.

В связи с этим в данной работе избран путь прямой оценки климатического ареала вида, т. е. совокупности точек географического пространства, в которых климат допускает устойчивое существование вида при благоприятном сочетании остальных факторов динамики численности. Напомним, что климат – статистическая характеристика погоды за значительный промежуток времени, в данном исследовании – 10 лет.

Ранее была предложена методология описания климатических ареалов видов с помощью климатических предикторов [Семенов и др., 2006]. Это специфическая для вида совокупность собственно гидрометеорологических параметров (приземной температуры, суммы осадков и т. д.) и/или же вычисленных на их основе прикладных климатических индексов (сумма эффективных температур, гидротермические коэффициенты и т. д.). Такая совокупность характеризует требование вида

к климату среды обитания. Как совокупность, так и критические границы параметров берутся из научных публикаций специалистов-экологов. Виды-инвайдеры сначала распространяются в пределах климатического ареала, поэтому фактическая зона распространения составляет лишь часть его. Впоследствии, при изменении климата изменяется и климатический ареал.

В последующем эта методология была разработана в направлении учёта неопределённости оценки [Семенов и др., 2020; Богданович, Семенов, 2023; Добролюбов и др., 2023]. Для промежутка времени в I лет и L имеющихся реализаций климата этого промежутка времени (их часто целый ансамбль в случае, если это результаты моделирования) для каждой точки географического пространства (на практике – для каждого узла пространственной сетки) статистическими методами оценивалась вероятность того, что эта точка принадлежит климатическому ареалу. Оценка основывается на числе лет n , для которых все требования вида к климату выполнены, из всей совокупности $N = I \times L$ лет.

Для описания климатического ареала *A. planipennis* в данной работе выбраны следующие климатические предикторы:

- Сумма эффективных температур (СЭТ) с порогом $10\text{ }^{\circ}\text{C} > 700\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$ [Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022b]; суммирование превышений среднесуточными значениями температуры воздуха в приповерхностном слое порога $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ производится по всему календарному году;

- Минимальная среднесуточная температура $> -34\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2020];

- Максимальная среднесуточная температура $< 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Barker et al., 2023].

К этим предикторам добавлены следующие, характеризующие кормовое растение – ясень [Афонин, Соколова, 2018]:

- Гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова > 0.7 ;

- Среднемесячная температура самого холодного месяца $> -18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приведённое в источнике требование СЭТ > 500 не использовалось, поскольку оно слабее первого условия для ЯУЗ.

К этим биологически существенным требованиям к климату добавлено формальное требование, чтобы среднемесячная температура января не превосходила 9 °С. Это ограничивает распространение *A. planipennis* в тропической зоне Северного полушария.

Расчёты климатических ареалов выполнялись с помощью системы RANGES, разработанной в Институте глобального климата и экологии имени акад. Ю.А. Израэля [Семёнов и др., 2020; Богданович, Семёнов, 2023; Дობролюбов и др., 2023].

Оценка климатического ареала ЯУЗ выполнена для трёх климатов, соответствующих 1990–1999 гг. (базовый период), 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. При этом использовались результаты расчёта климата, полученные с помощью глобальной климатической модели Института вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука в условиях сценария SSP7.0, любезно предоставленные Е.М. Володиным. Это сценарий умеренного антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Расчётный климат представлен пятью климатическими траекториями. Тем самым в данном случае $N = 50$, т. е. числу лет (10), умноженному на число траекторий (5). С этими данными была проведена коррекция, описанная в работе [Богданович и др., 2021]. Цель коррекции – максимальное соответствие расчётного климата 1990–1999 гг. результатам наблюдений, описанных в работе [Harris et al., 2020].

Полученные оценки вероятностей могут находиться в пределах полуинтервалов (0; 0.33], (0.33; 0.66], (0.66; 0.90], (0.90; 0.99], (0.99; 1.00]. Следуя традиции, принятой в научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), принадлежность словесно характеризуется соответственно следующим образом: «маловероятно», «средне вероятно», «вероятно», «весьма вероятно», «практически достоверно» [Mastrandrea et al., 2010].

В соответствии с [Богданович и др., 2021] результаты расчётов, а именно вероятность того, что определённая точка географического пространства принадлежит климатическому ареалу, далее представляется в виде балльной оценки. При балльной оценке категориям

маловероятно, средне вероятно, вероятно, весьма вероятно и практически достоверно присваиваются баллы 0, 1, 2, 3 и 4, соответственно. При картографическом отображении этим категориям соответствуют цвета: белый, жёлтый, тёмно-жёлтый, коричневый и тёмно-коричневый.

Изменение климата отражается в изменении балльных значений. Разности балльных значений могут быть (–4), (–3), (–2), (–1), 0, 1, 2, 3 и 4. Им соответствуют следующие вербальные характеристики: уменьшение (очень сильное, сильное, среднее, слабое), изменение не выявлено, увеличение (слабое, среднее, сильное, очень сильное). При картографировании этим значениям соответствуют следующие цвета: тёмно-зелёный, зелёный, светло-зелёный, салатовый, белый, розовый, красный, тёмно-красный, фиолетовый.

Для картографического отображения использовалась система QGIS и основа, предоставленные в INTERNET для свободного использования.

Результаты и обсуждение

Расчитанный нами климатический ареал ЯУЗ, соответствующий климату 1990–1999 гг., фрагментирован. Как и современная территория фактического распространения он состоит из трёх крупных частей – восточноазиатской, европейской и североамериканской (рис. 1). Штриховкой здесь и на последующих рисунках указана современная, на 2022–2023 гг., территория распространения *A. planipennis* в первичном ареале вида в Восточной Азии [Orlova-Bienkowskaja, Volkovitsh, 2018, с дополнениями] и в его вторичном ареале в Северной Америке [Emerald Ash Borer Information, 2022] и в Европе [Звягинцев и др., 2023; Баранчиков, Пономарёв, 2024].

На рис. 2 представлены тенденции изменения климатического ареала ЯУЗ в Восточной Азии: на рис. 2А – изменения в 2030–2039 гг. против 1990–1999 гг., а на рис. 2В – изменения в 2050–2059 гг. против 1990–1999 гг. Следует отметить, что на севере первичного ареала, на территории российского Дальнего Востока даже в настоящее время *A. planipennis* не занимает весь ареал своего

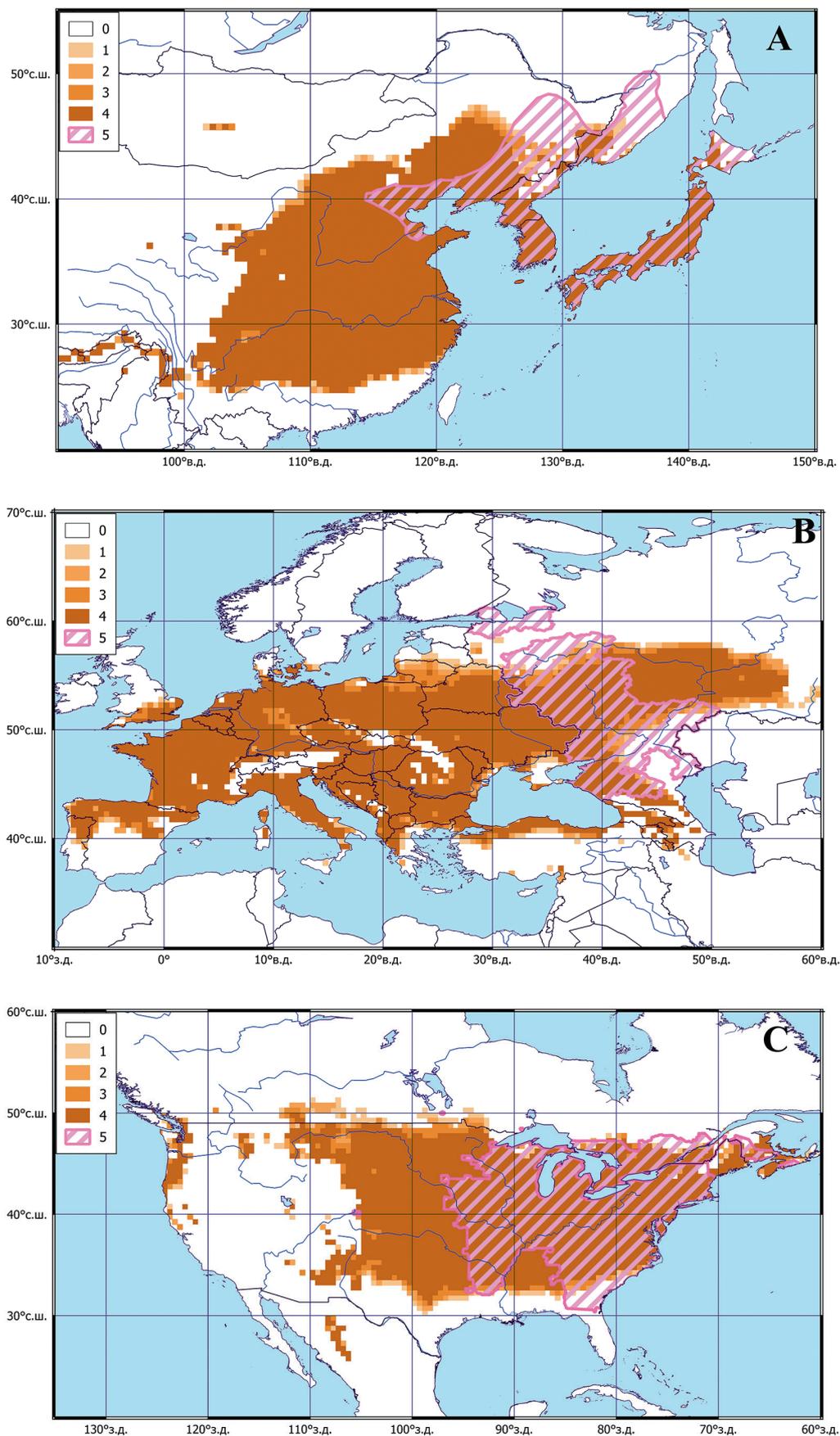


Рис. 1. Расчетный климатический ареал ЯУЗ в её первичной (А) и вторичной областях распространения (В и С), соответствующий климату 1990–1999 гг. (сплошная заливка), и современное распространение (штриховка). Обозначения вероятности принадлежности точки климатическому ареалу: 0 – маловероятно, 1 – средне вероятно, 2 – вероятно, 3 – весьма вероятно, 4 – практически достоверно; 5 – современное распространение.

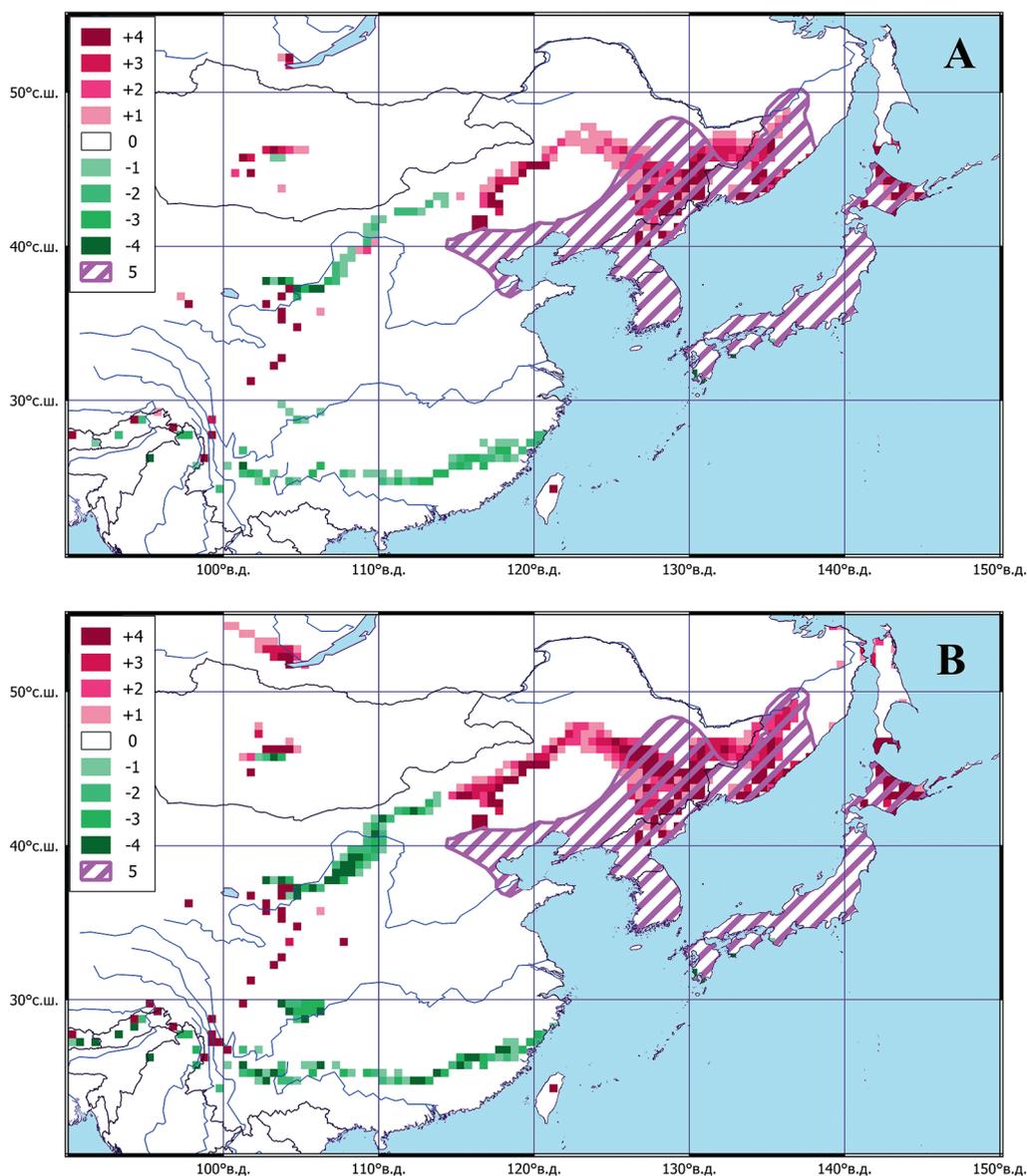


Рис. 2. Изменения вероятности принадлежности точки географического пространства к климатическому ареалу ЯУЗ в Восточной Азии: А – климат 2030–2039 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; В – климат 2050–2059 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; балльным значениям (–4), (–3), (–2), (–1), 0, 1, 2, 3 и 4 соответствуют категории: уменьшение (очень сильное, сильное, среднее, слабое), изменение не выявлено, увеличение (слабое, среднее, сильное, очень сильное).

основного кормового растения – ясеня манчжурского *F. mandshurica* (простирается на север до устья Амура, 59°59' с. ш. [Николаев, 1981]). До начала XXI в. (1935–1989 гг.) данный фитофаг был распространён лишь на самом юге Приморского края [Волкович, 2007; Юрченко, 2016]. К 2014 г., уничтожив искусственные посадки ясеня пенсильванского во Владивостоке и Хабаровске, ЯУЗ существенно продвинулась на север до п. Джонка на Амуре (49°40' с. ш. [Юрченко, 2016]). Это вполне укладывается в тенденцию изменения северной границы ее климатического ареала в первой половине XXI в., представленную

на рис. 2А. Заметим, однако, что северная граница климатического ареала *A. planipennis* на Дальнем Востоке определяется требованием ЯУЗ к обеспеченности теплом ($CЭТ > 700$ °С·сут), а не наличием кормового растения (*F. mandshurica* распространён и севернее). В связи с этим, как показал расчёт, изменения климатического ареала, представленные на рис. 2А, весьма умеренные по сравнению с изменениями в Европе и Северной Америке, которые обсуждаются далее. Ко второй половине XXI в. существенных изменений в климатическом ареале ЯУЗ в Восточной Азии не предвидится (рис. 2В).

На рис. 1В представлен расчётный климатический ареал *A. planipennis* в Европе, Сибири и Передней Азии в 1990–1999 гг. и современная зона фактического распространения (штриховкой покрыты территории административных единиц России и Украины, в которых найдена ЯУЗ к началу 2023 г.). В конце 2023 г. она была обнаружена в Киеве [Strygun et al., 2023]. Из рисунка видно, что уже к концу XX в. климатический ареал вида занимал практически всю Европу за исключением Испании и Португалии (кроме их северных частей), центра и севера Англии, стран Скандинавии и Прибалтики, севера европейской части России. Ясень обыкновенный *F. excelsior* – существенный компонент озеленения населённых пунктов Западной Европы. Так, участники проекта COST из 29 стран этого региона учли около 401 млн деревьев на улицах европейских населённых пунктов. Они принадлежали к 152 семействам, 682 родам и 3510 видам. Ясень обыкновенный по числу деревьев занимал третье место (4.2%) вслед за дубом *Quercus robur* L. (4.8%) и клё-

ном *Acer platanoides* L. (4.9%) [Augustinus et al., 2024].

В начале XXI в. северная граница расчётного климатического ареала *A. planipennis* в Европе существенно сдвигается на север. Эта тенденция отражена на рис. 3А, где представлены изменения расчётного климатического ареала ЯУЗ в 2030–2039 гг. по отношению к 1990–1999 гг. Он распространяется на страны Прибалтики, Данию, юг Швеции, Ирландию, центр Англии и территории на европейской части России до 60° с. ш. Эта тенденция подтверждается регистрацией очагов инвайдера в Ярославле (с 2013 г.) [Orlova-Bienkowskaja, 2014] и в Санкт-Петербурге (с 2020 г.) [Волкович, Суслов, 2020]. При этом первые повреждения златкой в окрестностях Санкт-Петербурга датируются 2014 г. [Баранчиков, 2020]. Интересно, что результат нашего расчёта в значительной степени совпадает с результатом расчёта потенциального ареала вида в 2001–2018 гг., выполненного в работе [Rossi et al., 2024].

Часть климатического ареала *A. planipennis* в Европе, первоначально расположенная к

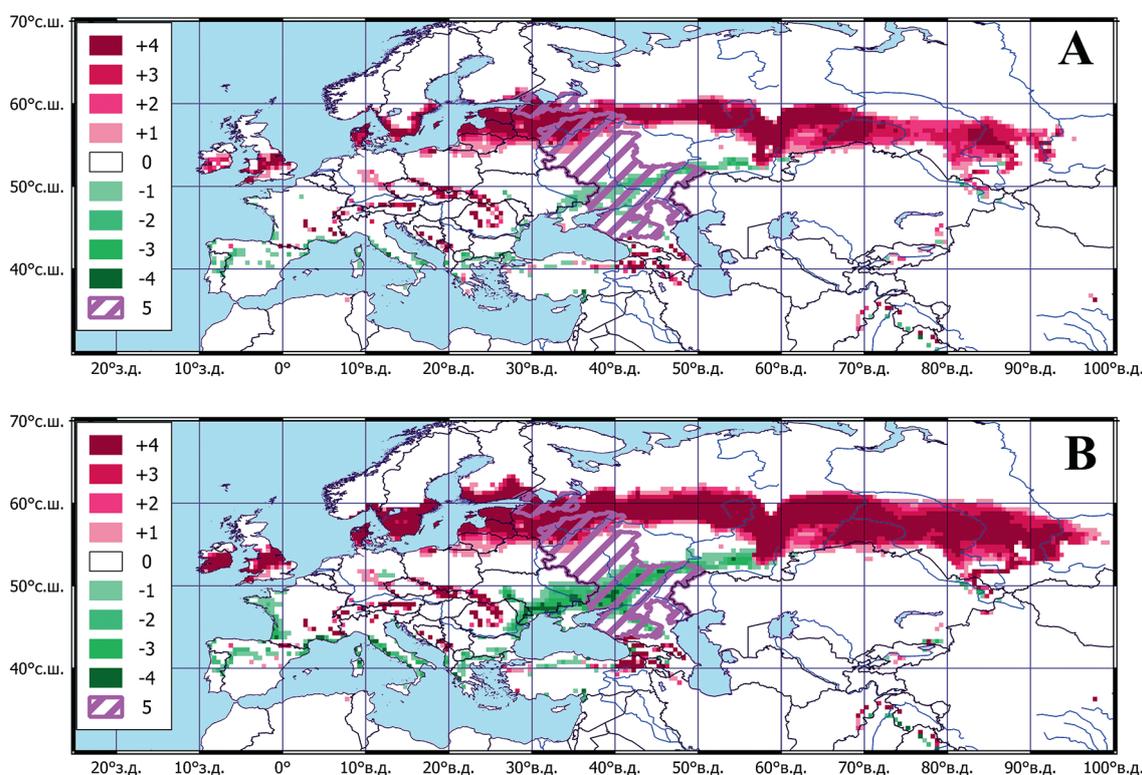


Рис. 3. Изменения вероятности принадлежности точки географического пространства к климатическому ареалу ЯУЗ в Европе, Передней Азии и Сибири: А – климат 2030–2039 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; В – климат 2050–2059 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; балльным значениям (–4), (–3), (–2), (–1), 0, 1, 2, 3 и 4 соответствуют категории: уменьшение (очень сильное, сильное, среднее, слабое), изменение не выявлено, увеличение (слабое, среднее, сильное, очень сильное).

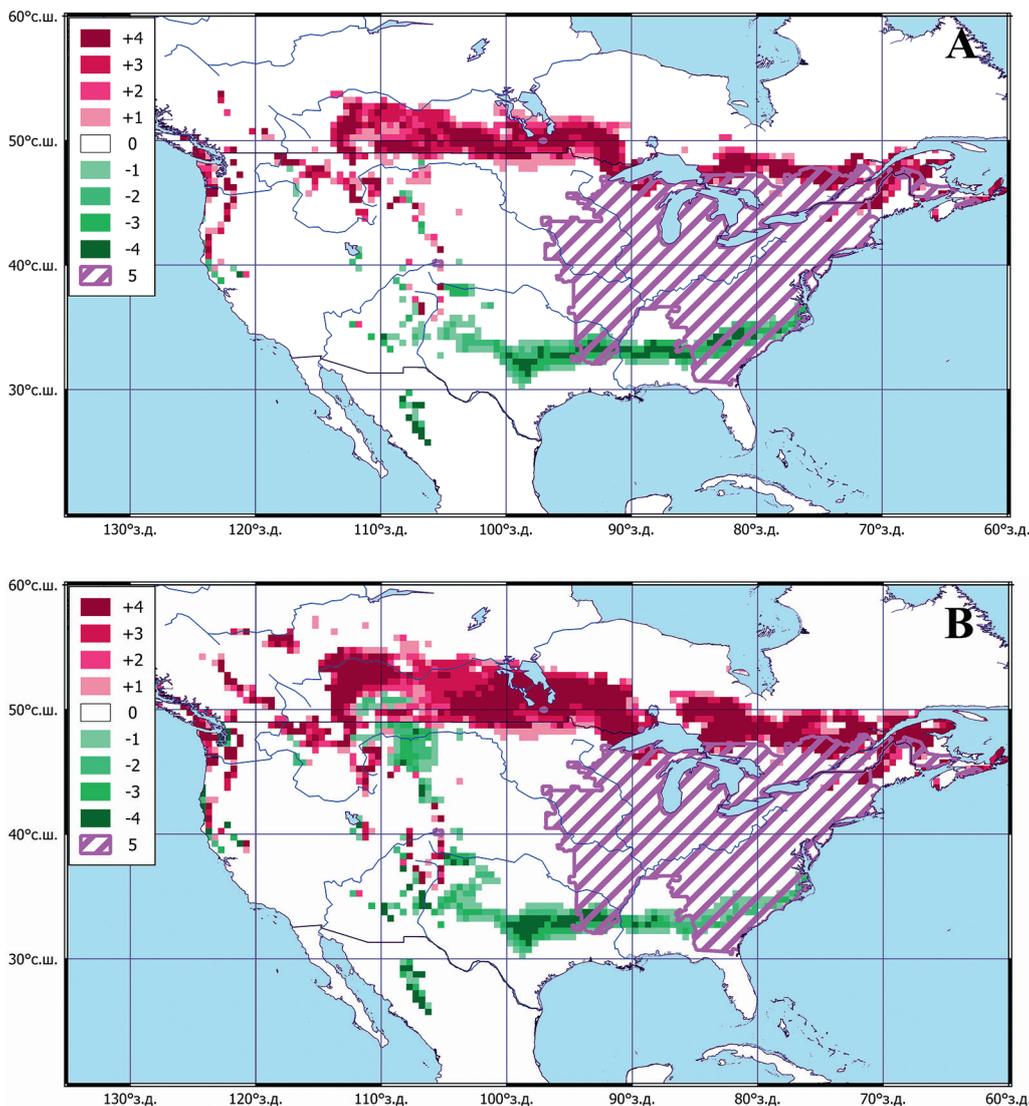


Рис. 4. Изменения вероятности принадлежности точки географического пространства к климатическому ареалу ЯУЗ в Северной Америке: А – климат 2030–2039 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; В – климат 2050–2059 гг. vs. климат 1990–1999 гг.; балльным значениям (–4), (–3), (–2), (–1), 0, 1, 2, 3 и 4 соответствуют категории: уменьшение (очень сильное, сильное, среднее, слабое), изменение не выявлено, увеличение (слабое, среднее, сильное, очень сильное).

востоку от современной зоны её распространения в полосе между 53 и 57° с. ш., с дальнейшим потеплением климата продвигается на восток в Западную и далее в Восточную Сибирь. Это отражено на рис. 3А и 3В, на которых представлены изменения расчётного климатического ареала ЯУЗ соответственно в 2030–2039 гг. и 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. В городских посадках на этой территории нередок ясень пенсильванский. Эта порода третья по числу деревьев в Екатеринбурге (Средний Урал) (А.Г. Ширяев, личное сообщение) и она достаточно обычна на улицах и в парках таких сибирских городов как Тюмень [Видякина и др., 2013], Новосибирск, Барнаул и Красноярск [Чиндяева и др.,

2018]. В Абакане (Республика Хакасия) в последние годы тополя массово заменяют также на ясень пенсильванский [В Абакане..., 2019]. Ясень европейский *F. excelsior* за Уралом не встречается: он существенно менее морозостоек, нежели ясень пенсильванский [Huxley, Griffiths, 1992]. При этом удивляет отсутствие даже попыток использовать в озеленении городов востока Европы и Сибири устойчивые к ЯУЗ восточноазиатские виды ясеней.

На рис. 1С представлен расчётный (на 1990–1999 гг.) климатический ареал ЯУЗ в Северной Америке и фактическая зона её распространения. Завезённая в штат Мичиган в середине 1990-х, к настоящему времени она освоила большую, восточную часть кли-

матического ареала. В начале XXI в. расширила свою зону обитания на север, проникнув в канадские провинции Онтарио (в 2002 г.), Манитоба (в 2017), Новая Шотландия, Нью-Брунсуик (в 2018) и Квебек (в 2019 г.) [CFIA, 2024].

В конце XX в. небольшие участки климатического ареала наметились на западном побережье – в штатах Орегон и Вашингтон, а также в прилегающей юго-западной части территорий Канады (рис. 1С). К настоящему времени эта тенденция в распространении инвайдера усилилась, что отразилось на расположении расчётного климатического ареала в 2030–2039 гг. (рис. 4А). Сейчас часть этих регионов уже освоена златкой: в Орегоне она появилась в 2022 г., в Ванкувере (Британская Колумбия) в 2024-м [Emerald Ash Borer Information. 2022; CFIA, 2024]. Небольшие участки климатического ареала расположены также на севере Мексики. К середине XXI в. климатический ареал вида существенно расширится на север до 55-й параллели (рис. 4В) в южных частях канадских провинций Альберта, Саскачеван и Манитоба. Его северная граница практически совпадет с северной границей ареала ясеня *F. pennsylvanica*, а к северу и северо-востоку от Великих озёр – с границей ареала *F. nigra* [ForeCASTS..., 2016].

Заключение

Наши результаты подтверждают заключение американских экспертов: «Что касается инвазионных лесных вредителей, ЯУЗ вполне может представлять собой наихудший сценарий» [Herms, McCullough, 2014].

Действительно, в настоящее время не существует климатических препятствий для дальнейшего распространения *A. planipennis* в Европе. При этом все три вида европейских ясеней (*F. excelsior*, *F. ornus* L. и *F. angustifolia* Vahl) неустойчивы к этому вредителю [Баранчиков и др., 2014].

В России ЯУЗ вскоре будет найдена на черноморском побережье, а её распространение на север ограничено лишь наличием в посадках ясеня пенсильванского. Наибольшую опасность представляет восточная широкая полоса климатического ареала, захватывающая Средний и Южный Урал и юг Сибири

вплоть до Енисея. Населению крупных городов в этих регионах (Екатеринбурга, Тюмени, Новосибирска, Барнаула, Красноярска и др.) следует внимательно отслеживать состояние деревьев ясеня пенсильванского и, по возможности, начать менять его на ясень манчжурский, устойчивый к инвайдерам.

В ходе текущего десятилетия вполне возможно появление ЯУЗ и на юге Западной Азии: в Казахстане, Турции и Иране. На это указывали и ранее [Orlova-Bienkowskaja, Bienkowski, 2022a], исходя, однако, лишь из наличия там кормовых растений вредителя.

В Северной Америке *A. planipennis* заселила почти две трети своего климатического ареала. Нет основания полагать, что эта экспансия будет остановлена, несмотря на существенные успехи в разработке биологических методов борьбы с этим вредителем в США [Duan et al., 2022].

В первичной зоне распространения ЯУЗ в Восточной Азии климатический ареал также не освоен полностью, но её распространение тут сдерживается всем комплексом биологических факторов – коэволюционных ограничителей её численности: как устойчивостью местных видов ясеней, так и эффективным комплексом патогенов и паразитоидов [Sun et al., 2024]. На Дальнем Востоке в условиях рассматриваемых изменений климата в XXI в. продвижение северной границы климатического ареала *A. planipennis* на север, в том числе на территории России, ожидается небольшое по сравнению с её продвижением в Европе.

Финансирование работы

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание Института леса им. В.Н. Сукачёва ФИЦ КНЦ СО РАН, проект FWES-2024-0029) в части экологического анализа проблемы и Росгидрометом (госзадание ФГБУ «ИГКЭ» № 169-00009-24-00, проект 3.1.2) в части модельных расчётов климатообусловленных рисков.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит исследований с участием животных в экспериментах, выполненных кем-либо из авторов.

Литература

- Афонин А.Н., Соколова Ю.В. Эколого-географический анализ и моделирование распространения биологических объектов с использованием ГИС. СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. 121 с.
- Баранчиков Ю.Н. Датировка начала инвазии *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) в Санкт-Петербург с помощью интернет-технологий // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах. XI Чтения памяти О.А. Катаева. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 70–71.
- Баранчиков Ю.Н., Демидко Д.А., Звягинцев В.Б., Серая Л.Г. Ясенева узкотелая златка в Москве: дендрохронологическая реконструкция хода инвазии // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы II Всероссийской научной конференции (с международным участием). М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 23–24.
- Баранчиков Ю.Н., Пономарёв В.И. Ясенева изумрудная узкотелая златка (*Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888) достигла Кавказа // Промышленная ботаника. 2024. Вып. 24. № 1. С. 69–72.
- Баранчиков Ю.Н., Серая Л.Г., Гринаш М.Н. Все виды европейских ясеней неустойчивы к узкотелой златке *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera, Buprestidae) – дальневосточному инвайдеру // Сибирский лесной журнал. 2014. № 6. С. 80–85.
- Богданович А.Ю., Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. № 1. С. 20–35.
- Богданович А.Ю., Семенов С.М. Оценка климатических ареалов видов с использованием системы RANGES // Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023: Сб. тезисов докладов международной конференции. М.: Физмат-книга, 2023. С. 220–220. ISBN 978-5-89155-397-2
- В Абакане тополя меняют на американские ясени // Sreda24.ru, 2019 (Электронный документ) // (<https://sreda24.ru/index.php/novosti/aktualno/item/10937-v-abakane-topolya-menyayut-na-amerikanskie-yaseni>). Проверено 18.06.2024.
- Видякина А.А., Семёнова М.В., Боме Н.А. Древесно-кустарниковая флора автомобильных дорог г. Тюмени // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. // (<http://science-education.ru/ru/article/view?id=9644>). Проверено 06.08.2024.
- Волкович М.Г. Узкотелая златка *Agrilus planipennis* – новый опаснейший вредитель ясеней в европейской части России // Жуки (Coleoptera) и колеоптерологи. 2007 // (https://www.zin.ru/animalia/coleoptera/rus/eab_2007.htm). Проверено 18.06.2024.
- Волкович М.Г., Суслов Д.В. Первая находка изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) в Санкт-Петербурге свидетельствует о реальной угрозе дворцово-парковым ансамблям Петергофа и Ораниенбаума // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах. XI Чтения памяти О.А. Катаева. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 119–120.
- Гниненко Ю.И., Клюкин М.С. Последствия инвазии златки: состояние посадок ясеня в Москве и Московской области // Ясенева узкотелая изумрудная златка – распространение и меры защиты в США и России. Пушкино: ВНИИЛМ, 2016. С. 34–44.
- Добролюбов Н.Ю., Семёнов С.М., Володин Е.М., Богданович А.Ю. Алгебраический алгоритм статистической оценки параметра биномиального распределения и пример его применения в одной глобальной геоинформационной задаче прикладной климатологии // Метеорология и гидрология. 2023. Вып. 10. С. 16–24.
- Звягинцев В.Б., Демидко Д.А., Пантелеев С.В., Пашенова Н.В., Серая Л.Г., Ярук А.В., Баранчиков Ю.Н. Распространение инвазивного возбудителя некроза ветвей ясеня аскомицета *Hymenoscyphus fraxineus* в европейской части России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 244. С. 82–117.
- Николаев Е.В. Род *Fraxinus* (Oleaceae) во флоре СССР // Ботанический журнал. 1981. Т. 66. № 10. С. 1419–1432.
- Селиховкин А.В., Нехаева М.Ю., Мельничук И.А. Экономические и социальные последствия инвазий вредителей и патогенов древесных растений в Санкт-Петербурге // Российский журнал биологических инвазий. 2023. № 2. С. 163–171.
- Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатических угроз по данным мониторинга климата // Метеорология и гидрология. 2020. Вып. 5. С. 59–65.
- Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. Выявление климатогенных изменений. М.: Метеорология и гидрология, 2006. 324 с.
- Чиндяева Л.Н., Томошевич М.А., Беланова А.П., Банаев Е.В. Древесные растения в озеленении сибирских городов. Новосибирск: ГЕО, 2018. 455 с.
- Юрченко Г.И. Ясенева узкотелая изумрудная златка на российском Дальнем Востоке // Ясенева узкотелая изумрудная златка – распространение и меры защиты в США и России / Ред. Ю.И. Гниненко. Пушкино: ВНИИЛМ, 2016. С. 5–10.
- Anulewicz A.C., McCullough D.G., Cappaert D.L., Poland T.M. Host range of the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) (Coleoptera: Buprestidae) in North America: results of multiple-choice field experiments // Environ. Entomol. 2008. Vol. 37. P. 230–241.
- Augustinus B.A., Kicic M., Battisti A. et al. The European urban tree inventory. EFUF 2024 conference poster. 2024. (Online document) // <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23047.00163>. Accessed 20.06.2024.

- Aukema J.E., Leung B., Kovacs K., Chivers C., Britton K.O., Englin J., Franke S.J., Haight R.G., Holmes T.P., Liebhold A.M., McCullough D.G., Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States // PLoS ONE. 2011. Vol. 6. No. 9. e24587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587>. Accessed 20.06.2024.
- Barker B.S., Coop L., Duan J.J., Petrice T.R. An integrative phenology and climatic suitability model for emerald ash borer // Front. Insect Sci. 2023. Vol. 3. 1239173. <https://doi.org/10.3389/finsec.2023.1239173>. Accessed 20.06.2024.
- Brockerhoff E.G., Liebhold A.M. Ecology of forest insect invasions // Biological Invasions. 2017. Vol. 19. P. 3141–3159.
- CFIA – Canadian Food Inspection Agency. Emerald ash borer – latest information. Government of Canada. 2024. (Online document) // (<https://inspection.canada.ca/en/plant-health/invasive-species/insects/emerald-ash-borer/latest-information>). Accessed 20.06.2024.
- Chesters D., Beckschäfer P., Orr M.C., Adamowicz S.J., Chun K.P., Zhu C.D. Climatic and vegetational drivers of insect beta diversity at the continental scale // Ecology and Evolution. 2019. Vol. 9 (24). P. 13764–13775.
- Dang Y.Q., Wei K., Wang X., Duan J.J., Jennings D.E., Poland T.M. Introduced plants induce outbreaks of a native pest and facilitate invasion in the plants' native range: evidence from the emerald ash borer // J. of Ecology. 2022. Vol. 110. P. 593–604.
- Dang Y.-Q., Zhang Y.-L., Wang X.-Y., Xin B., Quinn N.F., Duan J.J. Retrospective analysis of factors affecting the distribution of an invasive woodboring insect using native range data: the importance of host plants // J Pest Sci (2004). 2021. Vol. 94. P. 981–990.
- Duan J.J., Gould J.R., Slager B.H., Quinn N.F., Petrice T.R., Poland T.M., Bauer L.S., Rutledge C.E., Elkinton J.S., Van Driesche R. Progress toward successful biological control of the invasive emerald ash borer in the United States // Contributions of classical biological control to the U.S. food security, forestry, and biodiversity / Ed. R.G. Van Driesche. FHAASST-2019-05. USDA Forest Service, Morgantown, West Virginia, USA. 2022. P. 232–250. (<https://bugwoodcloud.org/resource/files/23194.pdf>). (Accessed 20.06.2024).
- Duan J.J., Schmude J.M., Larson K. Effects of low temperature exposure on diapause, development, and reproductive fitness of the emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae): implications for voltinism and laboratory rearing // J Econ Entomol. 2021. Vol. 114. P. 201–208.
- EFSA (European Food Safety Authority), Schans J., Schrader G., Delbianco A., Graziosi I., Vos S. Pest survey card on *Agrilus planipennis*. EFSA Support. Publ. 17. 2020. 1945E. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2020.EN-1945>. Accessed 20.06.2024.
- Emerald Ash Borer Information. 2022. Emerald Ash Borer Information Network. 2024. (Online document) // (<http://www.emeraldashborer.info/>). Accessed 20.06.2024.
- EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). Pest risk analysis for *Agrilus planipennis* // EPPO Bulletin. 2013. Vol. 43. P. 1–68.
- Evans H.F., Williams D., Hoch G., Loomans A., Marzano M. Developing a European toolbox to manage potential invasion by emerald ash borer (*Agrilus planipennis*) and bronze birch borer (*Agrilus anxius*), important pests of ash and birch // Forestry. 2020. Vol. 93 (2). P. 187–196.
- Fick W.E., MacQuarrie C.J. An artificial delay in emergence influences the number but not the fitness of adult emerald ash borer emerging from infested ash wood // Entomol Exp Appl. 2018. Vol. 166 (3). P. 171–182.
- Flø D., Krokene P., Økland B. Invasion potential of *Agrilus planipennis* and other *Agrilus* beetles in Europe: import pathways of deciduous wood chips and MaxEnt analyses of potential distribution areas // EPPO Bulletin. 2015. Vol. 45. P. 259–268.
- ForeCASTS Project. Forecasts of climate-associated shifts in tree species. *Fraxinus pennsylvanica*. USDA Forest Service, Southern Research Station, 2016. (Online document) // (https://www.geobabble.org/ForeCASTS/html/Fraxinus_pennsylvanica_final.elev.html). Accessed 20.06.2024.
- Franic I., Allan E., Prospero S., Adamson K. et al. Climate, host and geography shape insect and fungal communities of trees // Scientific Reports 2023. Vol. 13: 11570. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36795-w>. Accessed 20.06.2024.
- Gougherty A.V., Davies T.J. Host phylogenetic diversity predicts the global extent and composition of tree pests // Ecology Letters. 2022. Vol. 25 (1). P. 101–112.
- Gould J.R., Warden M.L., Slager B.H., Murphy T.C. Host overwintering phenology and climate change influence the establishment of *Tetrastichus planipennisi* Yang (Hymenoptera: Eulophidae), a larval parasitoid introduced for biocontrol of the emerald ash borer // J Econ Entomol. 2020. Vol. 6. P. 2641–2649.
- Haack R.A., Baranchikov Yu., Bauer L.S., Poland T.M. Chapter 1: Emerald ash borer biology and invasion history // Biology and control of emerald ash borer / Eds. R. Van Driesche, J. Duan, K. Abell, L. Bauer, J. Gould. Morgantown: USDA, 2015. FHTET-2014-09. P. 1–13.
- Harris I., Osborn T. J., Jones P.D., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. Vol. 7. 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>. Accessed 20.06.2024.
- Herms D.A., McCullough D.G. Emerald ash borer invasion of North America: history, biology, ecology, impacts, and management // Ann. Rev. Entomol. 2014. Vol. 59. P. 13–30.
- Huxley A., Griffiths M. The New Royal Horticultural Society Dictionary of Gardening. Vol. 4. London: MacMillan Press, 1992. 870 p.
- Invasive species in forests and rangelands of the United States. A comprehensive science synthesis for the United States forest sector / Poland T.M., Patel-Weynand T., Finch D.M., Miniati C.F., Hayes D.C., Lopez V.M. (Eds.). Springer Cham, 2021. 455 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45367-1>. Accessed 20.06.2024.
- Kirichenko N., Haubrock P.J., Cuthbert R.N., Akulov E., Karimova E., Shneyder Y., Liu C., Angulo E., Diagne C., Courchamp F. Economic costs of biological invasions in

- terrestrial ecosystems in Russia // *NeoBiota*. 2021. Vol. 67. P. 103–130.
- Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G.-K., Yohe G.W., Zwiers F.W. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties // IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties. Jasper Ridge, CA, USA 6–7 July 2010. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2010. (Online document) // (<http://www.ipcc.ch>). Accessed 20.06.2024.
- Maze D., Bond J., Mattson M. Modelling impacts to water quality in salmonid-bearing waterways following the introduction of emerald ash borer in the Pacific Northwest, USA // *Biological Invasions*. 2024. Online first. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10530-024-03340-3>. Accessed on 20.06.2024.
- Meshkova V., Borysenko O., Kucheryavenko T., Skrylnyk Y., Davydenko K., Holusa J. Potential westward spread of emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) from Eastern Ukraine. // *Forests*. 2023. Vol. 14. 736. <https://doi.org/10.3390/f14040736>. Accessed on 20.06.2024.
- Orlova-Bienkowskaja M.J. Ashes in Europe are in danger: the invasive range of *Agrilus planipennis* in European Russia is expanding // *Biological Invasions*, 2014. Vol. 16. Issue 7. P. 1345–1349.
- Orlova-Bienkowskaja M.J., Bienkowski A.O. Modeling long-distance dispersal of emerald ash borer in European Russia and prognosis of spread of this pest to neighboring countries within next 5 years // *Ecol. Evol.* 2018. Vol. 8. P. 9295–9304.
- Orlova-Bienkowskaja M.J., Bienkowski A.O. Minimum winter temperature as a limiting factor of the potential spread of *Agrilus planipennis*, an alien pest of ash trees, in Europe // *Insects*. 2020. Vol. 11 (4). 258. <https://doi.org/10.3390/insects11040258>. Accessed on 10.06.2024.
- Orlova-Bienkowskaja M.J., Bienkowski A.O. Southern range expansion of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, in Russia threatens ash and olive trees in the Middle East and Southern Europe // *Forests*. 2022a. Vol. 13. 541. <https://doi.org/10.3390/f13040541>. Accessed on 20.06.2024.
- Orlova-Bienkowskaja M.J., Bienkowski A.O. Low heat availability could limit the potential spread of the emerald ash borer to Northern Europe (Prognosis based on growing degree days per year) // *Insects*. 2022b, 13, 52. <https://doi.org/10.3390/insects13010052>. Accessed on 10.06.2024.
- Orlova-Bienkowskaja M.J., Volkovitsh M.G. Are native ranges of the most destructive invasive pests well known? A case study of the native range of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) // *Biol. Invasions*. 2018. Vol. 20. P. 1275–1286.
- Reed K., Denman S., Leather S.R., Forster J., Inward D.J.G. The lifecycle of *Agrilus biguttatus*: the role of temperature in its development and distribution, and implications for acute oak decline // *Agric For Entomol.* 2018. Vol. 20. P. 334–346.
- Rossi J.-P., Mouttet R., Rouse P., Streito J.-C. Modelling the potential range of *Agrilus planipennis* in Europe according to current and future climate conditions // *Trees, Forests and People*. 2024. Vol. 16. 100559. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100559>. Accessed on 20.06.2024.
- Seidl R., Klonner G., Rammer W., Essl F., Moreno A., Neumann M., Dullinger S. Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe's forests. // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. P. 16–26.
- Siegert N.W., McCullough D.G., Liebhold A.M., Telewski F.W. Dendrochronological reconstruction of the epicenter and early spread of emerald ash borer in North America // *Divers. and Distrib.* 2014. Vol. 20. P. 847–858.
- Sobek-Swant S., Kluza D.A., Cuddington K., Lyons D.B. Potential distribution of emerald ash borer: what can we learn from ecological niche models using Maxent and GARP? // *For. Ecol. Manag.* 2012. Vol. 281. P. 23–31.
- Straw A.N., Williams D.T., Kulinich O., Gninenko Y.I. Distribution, impact, and rate of spread of emerald ash borer *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in the Moscow region of Russia // *Forestry*. 2013. Vol. 86. P. 515–522.
- Strygun O., Chumak P., Anyol O., Kivel Y. Invasive and common arthropods – pests of plants of the genus *Fraxinus* L. in cenoses of Kyiv and Kyiv region // *Actual problems, ways and prospects of the development of landscape architecture, horticulture, urban ecology and phytoremediation. Materials of the 3 International Scientific and Practical Conference (Bila Tserkva, 21 September, 2023)*. Bila Tserkva, 2023. P. 54–57.
- Sun J., Koski T.M., Wickham J.D., Baranchikov Y.N., Bushley K.E. Emerald ash borer management and research: decades of damage and still expanding // *Annual Review of Entomology*, 2024. Vol. 69. P. 239–258. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-012323-032231>.
- Valenta V., Moser D., Kuttner M., Petersen J., Essl F. A high-resolution map of emerald ash borer invasion risk for Southern Central Europe // *Forests*. 2015. Vol. 6. No. 9. P. 3075–3086. DOI: 10.3390/f6093075

CHANGES IN CLIMATIC RANGE OF THE EMERALD ASH BORER *AGRILUS PLANIPENNIS* FAIRMAIRE (COLEOPTERA: BUPRESTIDAE) IN THE NORTHERN HEMISPHERE

© 2024 Baranchikov Yu.N.^{a, *}, Dobrolyubov N.Yu.^{b, **}, Semenov S.M.^{b, ***}

^a V.N. Sukachev Forest Institute, FIC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia

^b Y.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, 107258, Russia

e-mail: *baranchikov_yuri@yahoo.com; **dobronik@yandex.ru; ***SergeySemenov1@yandex.ru

The climatic range of a species is a set of points in geographical space in which the climate allows the stable existence of populations of the species under a favorable combination of other factors of its population dynamics. For the Northern Hemisphere, using a special set of climate predictors, the climatic range of the emerald ash borer *Agrilus planipennis* (EAB), a dangerous invasive pest of ash plantations, was assessed. Calculations were carried out for climates of 1990–1999, 2030–2039, and 2050–2059 under the SSP7.0 scenario, which describes a fairly moderate anthropogenic impact on the climate. The schematic maps have been constructed, which also indicate the current distribution zones of EAB. In North America, the borer has colonized almost two-thirds of its climatic range. There is no reason to believe that this expansion will be stopped. In the primary zone of distribution of the borer - in East Asia - and in Europe, the climatic ranges are also not fully occupied. Further expansion of the borer in its primary zone of distribution is expected to be comparatively modest due to the entire set of co-evolutionary biological factors restraining its number. On the contrary, in Europe the borer will be able to reach the Atlantic coast, since such restraints are either absent there or are just being formed. As calculations show, with further changes in the global climate, the dominant trend will be the movement of the northern boundaries of the EAB climatic range to the north. At the same time, on the territory of Russia it is also expected to expand into the Asian part, into Siberia, along a latitudinal band of 50–60° N with a climate suitable for *A. planipennis*. Already in 2030–2039, in an eastern direction, this band will reach the Krasnoyarsk Territory and will further spread to the east. Therefore, when installing artificial ash plantations in this area, it is advisable not to use ash species that are not resistant to this pest.

Key words: emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, climatic range, Eurasia, North America, climate change, shift in range boundaries.