

Литература

- Бондарцева М.А. Определитель грибов России. Порядок афиллофоровые. СПб.: Наука, 1998. 391 с.
- Двораковский М.С. Геоботанический анализ растительности балки Григорова (Совхозная) близ Сталинграда // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 1953. Т. 58, №3. С. 66-75.
- Двораковский М.С. Краткая характеристика естественных лесов Сталинградской области // Полезащитное лесоразведение на каштановых почвах. 1961. Вып. 1. С. 95-128.
- Двораковский М.С. О взаимоотношениях деревьев и кустарников в балке «Григорова» близ Сталинграда // Лес и степь. 1952. №12. С. 15-19.
- Киреев А.Ф. Родная природа. Волгоград: Изд-во «Нижне-Волжское», 1967. 271 с.
- Коткова В.М., Ниемеля Т., Винер И.А., Щигель Д.С., Кураков А.В. Трутовые грибы: материалы международного курса по экологии и таксономии дереворазрушающих базидиомицетов в Центральном-Лесном заповеднике. Учебное пособие. Хельсинки: Helsinki University Printing House, 2015. 95 с.
- Красная книга Волгоградской области. Книга в двух томах. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2. Растения и другие организмы / под ред. д.б.н., проф. О.Г. Барановой, д.б.н., проф. В.А. Сагалаева. Воронеж: ООО «Издат-Принт», 2017. 268 с.
- Курагина Н.С., Сагалаев В.А., Воржева В.В., Дронова В.А. Микобиота памятника природы «Григорова балка» (Волгоградская область) // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2021. №139. С. 39-45.
- Ниемеля Т. Трутовые грибы Финляндии и прилегающих территорий России. Хельсинки: изд-во Хельсинки, 2001. 120 с.
- Стаучан Е.А., Веденеев А.М. Агарикоидные грибы Советского района города Волгограда // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов. Сборник статей V международной научно-практической конференции. М.: Планета, 2015. С. 106-108.

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ *POLYGRAPHUS PROXIMUS* BLANDF В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ НА ОСНОВЕ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В MAXENT.

Керчев И. А.¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
ivankerchev@gmail.com

ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION POTENTIAL AND OUTBREAK RISKS OF *POLYGRAPHUS PROXIMUS* BLANDF IN NORTHERN EURASIA USING MAXENT BIOCLIMATIC MODELING

Kerchev I. A.¹

The study identified potential distribution areas for the invasive pest Polygraphus proximus (four-eyed fir bark beetle) using Maximum Entropy modeling (MaxEnt). The analysis revealed that key limiting factors for its spread are average temperature in the warmest quarter (~15–20 °C) and precipitation during this period (>250 mm). Risk maps highlighted three levels of danger for regions with suitable environmental conditions for the pest.

Современный научный подход к исследованию распространения видов предполагает выявление не только современного ареала, но и потенциальных возможностей их распространения, или потенциальных ареалов (Anderson, 2003). Особенно важно это при изучении редких, а также инвазивных видов. Понятие потенциального ареала вида было введено Т.А. Работновым (1983), как область, где климатические условия благоприятны для его обитания. Данное понятие близко к понятию экологического ареала (Селедец, Пробатова, 2007), однако не требует детального исследования и определения места вида в координатах экологических шкал. Потенциальный ареал опирается на климатические показатели и может быть определен с помощью биоклиматического моделирования и использовании ГИС-технологий. Одним из наиболее надежных инструментов биоклиматического моделирования на сегодняшний день является метод максимальной энтропии, реализованный в научном ПО MaxEnt (American Museum of Natural History, USA)

Уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) – инвазионный короед дальневосточного происхождения, вызывающий массовое усыхания насаждений пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) в Российской Федерации с начала XXI в. В настоящее время наблюдается расширение его ареала в сопредельные государства (Кривец и др., 2024, Kirichenko et al., 2024). Он включен в перечень карантинных вредных организмов, ограниченно распространенных на территории Евразийского экономического союза, а также с 2017 года включен в список карантинных вредителей ЕРРО А2. Оценка ЕРРО (2014) охватывала лишь территорию ЕС, основываясь на зонах морозостойкости и наличии кормовой базы (ареалов хвойных видов), что привело к грубым оценкам и игнорированию других климатических факторов. (ЕРРО, 2014).

Цель исследования – определение районов с благоприятными для распространения уссурийского полиграфа по биоклиматическим условиям с учетом последних данных по распространению вида и современного климата.

Для составления набора данных о распространении *P. proximus* в первичном ареале были использованы собственные наблюдения, а также база данных GBIF. Для вторичного ареала были использованы литературные указания (Кривец и др., 2024). Очистка набора данных включала прореживание точек для удаления излишней их агрегации, и удаления точек, помещенных в административные центры, отметок в искусственных и городских посадках вне темнохвойно-пихтовых насаждений. После верификации данных был составлен CSV-файл, содержащий только отметки с географической привязкой.

Моделирование проводилось в программном пакете MaxEnt. Для анализа были использованы климатические данные и данные о рельефе WorldClim (30", ~1 км²). Устранение многомерной коллинеарности 19 биоклиматических переменных было выполнено с использованием Statistica 12. Для финального построения модели были отобраны биоклиматические переменные, показавшие в расчетах Maxent наибольшую значимость. Использованные переменные: bio 10 (средняя температура самого теплого квартала), bio 18 (осадки самого теплого квартала), bio 4 (сезонность температуры), bio 6 (минимальная температура самого холодного месяца), bio 15 (сезонность осадков), bio 17 (осадки самого сухого квартала). Ландшафтные параметры были удалены, так как высотные характеристики для распространения уссурийского полиграфа не оказывают значимого воздействия (Керчев, 2014), и в тестовых анализах также показали себя в качестве слабого предиктора. Обучающая выборка – 126 точек, тестовая выборка 42 точки (25% от общего числа, случайное

разбиение) фоновые точки – 10000. Степень прогнозирования моделирования оценивалась в зависимости от наиболее часто используемого показателя AUC как плохая ($AUC \leq 0.80$), хорошая ($0.90 < AUC < 0.95$) и отличная ($0.95 < AUC < 1.00$) (Ohara, 2005). Оценки погрешности для определения веса каждой переменной проведены с помощью Jack knife-теста.

Степень прогнозирования полученной модели можно охарактеризовать как «отличную» (Training AUC – 0.970; Test AUC – 0.957), устойчивость модели подтверждена на независимых данных. Объясняющая способность модели (Regularized Training Gain) – 2.013 (хорошая). Модель хорошо предсказывает новые данные (Unregularized Test Gain = 2.264). Наибольший вклад отмечен для двух переменных: bio 10 – 34.5 % (важность показателя – 9.9) и bio 18 с меньшим вкладом (29.6%), но со значительно большей важностью (29.2). Данный результат указывает, что два этих показателя являются основными лимитирующими факторами распространения уссурийского полиграфа. Сезонность и зимние условия также оказались важными параметрами, но в гораздо меньшей степени.

Анализ кривых ответа показал, что оптимум для вида по средней температуре в наиболее теплый квартал (bio 10) находится в диапазоне 15–20 °C, а по количеству осадков (bio 18) >250 мм. По показателю минимальной температуры в наиболее холодный месяц (bio 6) наблюдается резкий спад при значениях при < -15°C (лимитация холодом). Исключение из анализа показателя средней температуры самого холодного квартала (bio 11), проведенное для уменьшения мультиколлинеарности лишь незначительно снизило AUC (0.002).

Окончательный результат был нанесен на карту Северной Евразии после растеризации с помощью программного обеспечения QGIS. Результаты представлены в логистическом формате, дающем оценку вероятности пригодности биоклиматических условий для обитания вида в конкретной географической точке от 0 до 1 (Рисунок).

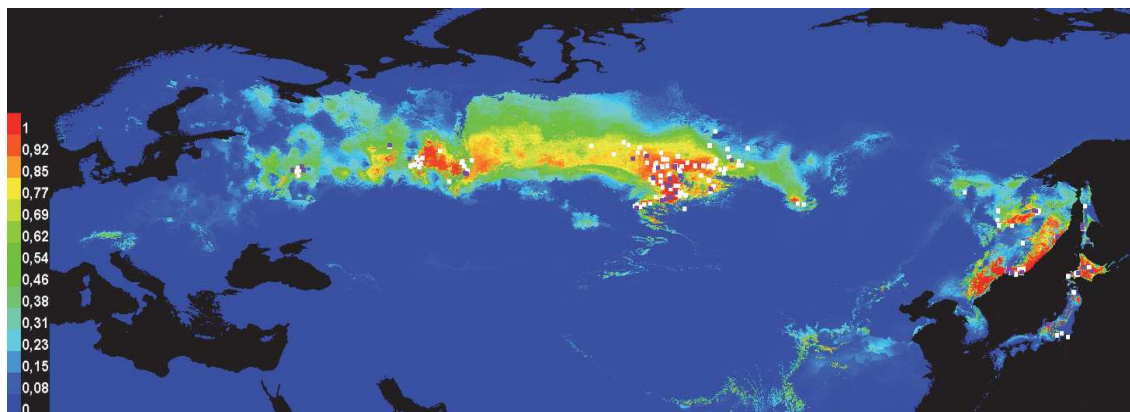


Рис. Прогнозируемый ареал *Polygraphus proximus*, построенный в среде Maxent

Среди ограничений модели можно отметить вероятную недооцененность ареала в регионах с экстремальными условиями из-за ограниченности данных, используемых при обучении и достаточно высокой экологической пластичности вида (Керчев, 2014).

В результате прогнозирования получена тематическая карта, отражающая пригодность территорий для распространения вида. В текущих климатических

условиях модель MaxEnt допускает с разной вероятностью распространение уссурийского полиграфа в границах всего ареала *A. sibirica*.

Полученная прогнозная карта демонстрирует высокий риск инвазии и формирования очагов в регионах, где сочетаются два условия: биоклиматические показатели близки к оптимуму для жука (вероятность присутствия >0.356), а его кормовая порода испытывает климатический стресс (пригодность для *A. sibirica* <0.377). Особую опасность представляют территории: с критическим риском формирования очагов ($P. proximus >0.356 + A. sibirica <0.214$) – зоны неизбежных всплесков численности; высоким риском ($P. proximus >0.356 + A. sibirica 0.214–0.377$) – участки потенциально быстрой колонизации; средним риском ($P. proximus 0.162–0.356$) – территории необходимого мониторинга.

Несмотря на довольно высокую точность модели у нее есть и возможные ограничения, обусловленные размерами выборки исходных данных, использованных при обучении – по этой причине она может ложно исключать зоны с экстремальными, но достаточными для существования условиями для *P. proximus*.

Применение прогнозов биоклиматического моделирования может стать важным элементом в развитии подходов лесного карантина и лесозащиты, основанных на таргетном мониторинге и раннем обнаружении чужеродных вредителей, что позволит минимизировать экологический и экономический ущерб.

Благодарности: Работа выполнена при финансировании Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта № FWRG-2025-0002.

Литература

Anderson R.P., Lew D., Peterson A.T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting models // Ecological Modelling. 2003. Vol. 162. P. 211–232.

Kirichenko NI, Rudoi VV, Efremenko AA, Petrov AV, Baranchikov YN (2023) First record of the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Republic of Kazakhstan. Acta Biologica Sibirica. 9, 1003-1022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199570>

Ohara M. Insect specimens of Hokkaido University. Version 1.9. National Museum of Nature and Science, Japan. 2025 Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/8jom8j> accessed via GBIF.org on 2025-04-18. <https://www.gbif.org/occurrence/1828852850>

Swets, J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science 1988, 240, 1285–1293.

The International Barcode of Life Consortium. International Barcode of Life project (iBOL). 2024. Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/inygc6> accessed via GBIF.org on 2025-04-18. <https://www.gbif.org/occurrence/2249979761>

Керчев, И. А. Экология полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) в Западно-Сибирском регионе инвазии / И. А. Керчев // Российский журнал биологических инвазий. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 80-95.

Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М. [и др.] Обзор современного вторичного ареала Уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации // Российский журнал биологических инвазий. 2024. – Т. 17, № 1. – С. 49-69. – DOI 10.35885/1996-1499-17-1-49-69.

Работнов Т.А. Фитоценология. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1983. 292 с.

Селедец В.П., Пробатова Н.С. Экологический ареал вида у растений. Владивосток: Дальнаука, 2007. 98 с.