

УДК 57.045

DOI: 10.36305/0513-1634-2022-145-25-36

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
TRACHYCARPUS FORTUNEI (HOOK.) H. WENDL И *PAYSANDISIA ARCHON*
BURMEISTER**

Алексей Валентинович Егошин

Сочинский национальный парк 354002, Краснодарский край, г. Сочи,
Курортный проспект, д. 74
E-mail: avegoshin@gmail.com

В статье приведены результаты моделирования пространственного распределения *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H. Wendl и *Paysandisia archon* Burmeister. Предикторными переменными, внесшими наиболее весом (Hook.) H. Wendl и *Paysandisia archon* являются количество и сезонное распределение атмосферных осадков, а также застроенность территории (EarthEnv, class 9). Установлено, что во вторичном ареале этот вид стал осваивать более влажные условия произрастания, чем у себя на родине. Вредитель *Paysandisia archon* непреднамеренно завезённый на юг Российского Причерноморья и выступающий в роли биотического фактора, ограничивающегося распространение во вторичном ареале *Trachycarpus fortunei* предпочитает места обитания, испытывающие более сильную антропогенную нагрузку, чем *Trachycarpus fortunei*.

Ключевые слова: чужеродные виды; инвазии; фитоинвазии; Кавказ; моделирование

Введение

Ключевыми факторами, определяющими распространение чужеродных видов в пространстве и времени, являются климатические, биотические, исторические (история появления вида на новой родине), а также нарушения естественного растительного покрова [11]. Вклад некоторых факторов, играющих ключевую роль в распространении чужеродных видов можно количественно оценить.

Прогнозирование инвазий предполагает, что чужеродные виды на новой родине будут преимущественно занимать территории со схожими биоклиматическими условиями («нишевый консерватизм»). Согласно этому утверждению инвазионный ареал вида может быть спрогнозирован с использованием только пространственных данных присутствия экземпляров вида в нативном ареале. Тем не менее ряд исследований [8] свидетельствует о том, что пришлые виды на новой родине зачастую осваивают места обитания, климатические условия которых отличаются от таковых в естественном ареале, т.е. экологические требования пришлых видов зачастую меняются по мере освоения новых пространств с течением времени. Такие изменения могут быть результатом трансформаций, как фундаментальной, так и реализованной ниши вида. В первом случае можно говорить об эволюционных изменениях чужеродных видов на новой родине, вызванных селективным прессом. Во втором случае - об «отключении» биотических факторов, которые ограничивали распространение вида в нативном ареале. Многие чужеродные виды у себя на родине не в полной мере реализуют климатическую нишу в виду наличия различных биотических взаимодействий [4], и отсутствие пресса со стороны конкурентов и хищников может приводить к изменению экологических ниш во вторичном ареале [5, 7].

Кроме того, антропогенная деятельность, оказывая значительное влияние на экологические факторы (нарушения растительного покрова, освещённость, изменения различных почвенных характеристик и т.д.) может способствовать появлению

экземпляров чужеродных видов в нетипичных для нативного ареала экологических условиях.

Таким образом, биотические и эволюционные изменения на территориях вне естественного ареала потенциально могут способствовать освоению пришлыми видами новых местообитаний с не характерным сочетанием климатических и экологических факторов, то есть наблюдаемые изменения в распространении вида могут быть результатом изменений как фундаментальной, так и реализованной ниши. Поэтому оценка роли различных факторов в пространственном распределении чужеродных видов в первичном и вторичных ареалах представляет большой интерес.

Общее количество чужеродных видов в регионе исследований составляет 183 [1], при этом некоторые из них отличаются высокой декоративностью, что способствовало их широкому распространению. Так в качестве декоративной культуры на побережье Сочи в 1872 г. был завезён трахикарпус Форчуна (*Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl) [2]. Этот высокодекоративный вид семейства пальмовых (Arecaceae) успешно акклиматизировался и впоследствии широко использовался при озеленении улиц города Сочи. В последующие десятилетия были отмечены первые случаи проникновения экземпляров этого вида в нарушенные лесные экосистемы региона. В настоящее время вид продолжает активно распространяться в регионе, поэтому является актуальным выявление факторов, ограничивающих распространение экземпляров вида во вторичном ареале.

Примечательно, что в 2014 г. на побережье был завезен чужеродный вид насекомых - южноамериканский пальмовый бурильщик (*Paysandisia archon* Burmeister), который питается древесиной *T. fortunei*, разрушая сердцевину и поражая точку роста пальмы. Таким образом, этот чужеродный вид насекомых стал выступать в роли биотического фактора, ограничивающего распространение трахикарпуса во вторичном ареале. На текущий момент времени от вредителя преимущественно пострадали экземпляры трахикарпуса, произрастающие в городской черте. В связи с этим так же представляет интерес насколько реализованная ниша фитофага-инвайдера будет совпадать с таковой *T. fortunei* во вторичном ареале.

Материал и методика

Регионом исследований является Большой Сочи, простирающийся от водораздела горных рек Шепси и Магри – на северо-западе до реки Псоу – на юго-востоке, на государственной границе РФ с республикой Абхазия. Большую часть площади (83%) района исследований занимают особо охраняемые природные территории федерального значения (ФГБУ «Сочинский национальный парк» и ФГБУ «Кавказский государственный природный биосферный заповедник имени Х.Г. Шапошникова»).

В ходе проведения полевых исследований фиксировали географические координаты мест присутствия экземпляров чужеродных видов *T. fortunei* и *P. archon*. Помимо этого, при моделировании пространственного распределения использовали географические координаты местонахождений экземпляров изучаемых видов, представленные в свободном доступе на сайте глобального информационного фонда по биоразнообразию (The Global Biodiversity Information Facility) и картографической системы раннего обнаружения и распространения инвазионных видов (Early Detection and Distribution Mapping System). Далее данные о распространении пришлых видов были пространственно "прорежены" с использованием инструментария SDMtoolbox в среде ArcGIS (дистанция прореживания составила 1 км) (табл. 1).

Таблица 1

Биоклиматические переменные BIOCLIM

Код	Биоклиматический параметр
BIO1	Средняя годовая температура
BIO2	Средняя суточная амплитуда температуры
BIO3	Изотермичность (BIO1/BIO7)
BIO4	Температурная сезонность
BIO5	Максимальная температура самого теплого месяца года
BIO6	Минимальная температура самого холодного месяца года
BIO7	Годовая амплитуда температуры (BIO5–BIO6)
BIO8	Средняя температура самой влажной четверти года
BIO9	Средняя температура самой сухой четверти года
BIO10	Средняя температура самой тёплой четверти года
BIO11	Средняя температура самой холодной четверти года
BIO12	Годовая сумма осадков
BIO13	Сумма осадков в самом влажном месяце года
BIO14	Сумма осадков в самом сухом месяце года
BIO15	Коэффициент вариации осадков
BIO16	Сумма осадков во влажной четверти года
BIO17	Сумма осадков в сухой четверти года
BIO18	Сумма осадков в самой теплой четверти года
BIO19	Сумма осадков в самой холодной четверти года

Впоследствии по каждому из видов были сформированы четыре набора пространственных данных: глобальные данные о пространственном распределении видов; данные о пространственном распределении видов в первичном ареале; данные о пространственном распределении видов во вторичном ареале и данные о пространственном распределении видов на юге Российского Причерноморья (табл. 2).

Таблица 2

Экологические переменные ENVIREM

Переменная	Описание	Единицы измерения
annualPET	Годовая потенциальная эвапотранспирация	мм / год
aridityIndexThornthwaite	Индекс засушливости Торнтвейта	-
climaticMoistureIndex	Метрика относительной влажности и засушливости	-
continentality	Средняя температура самого теплого месяца - средняя температура самого холодного месяца	°C
embergerQ	Плювиотермический коэффициент Эмбергера	-
growingDegDays0	Сумма среднемесячной температуры за месяцы со средней температурой выше 0°C, умноженная на количество дней	-
growingDegDays5	Сумма среднемесячной температуры за месяцы со средней температурой более 5°C, умноженная на количество дней	-
maxTempColdestMonth	Максимальная температура самого холодного месяца года	°C * 10
minTempWarmestMonth	Минимальная температура самого тёплого месяца года	°C * 10
monthCountByTemp10	Количество месяцев со средней температурой выше 10°C	месяцы
PETColdestQuarter	Среднемесячная эвапотранспирация самой холодной четверти года	мм / месяц
PETDriestQuarter	Среднемесячная эвапотранспирация самой засушливой четверти года	мм / месяц
PETseasonality	Ежемесячная изменчивость потенциальной эвапотранспирации	мм / месяц
PETWarmestQuarter	Среднемесячная эвапотранспирация самой тёплой четверти года	мм / месяц
PETWettestQuarter	Среднемесячная эвапотранспирация самой влажной четверти года	мм / месяц
thermInd	Компенсированный индекс термичности	°C
tri	Индекс расчленённости рельефа	-
topoWet	SAGA-GIS топографический индекс влажности	-

Моделирование пространственного распределения экземпляров чужеродных видов проводили с использованием MaxEnt (Version 3.4.4) методом максимальной энтропии. Расчеты по каждому из видов производили в 15 повторностях, выполняя 10 тысяч итераций по каждому пикселю растровых изображений. Для каждого изучаемого вида 30% точек находок использовали в качестве тестовой выборки, 70% – в качестве обучающей (табл. 3).

Таблица 3

Переменные EarthEnv

Переменная	Описание
Elevation	Высота над уровнем моря
Roughness	Расчленённость рельефа
Terrain Ruggedness Index	Индекс выровненности рельефа
Topographic Position Index	Различия в высоте над уровнем моря ячейки с высотой над уровнем 8-ми соседних ячеек растрового изображения
Vector Ruggedness Measure	Пересечённость рельефа с учётом трёхмерной ориентации ячеек раstra в отношении друг к другу
Aspect Cosine	Экспозиция (косинус угла)
Aspect Sine	Экспозиция (синус угла)
Slope	Уклон
Eastness	«Восточность» склона
Northness	«Северность» склона
Profile curvature	Кривизна профиля
Tangential curvature	Тангенциальная кривизна профиля
First order partial derivative (E-W slope)	Производные первого порядка, представляющие изменение значений абсолютной высоты с востока на запад
First order partial derivative (N-S slope)	Производные первого порядка, представляющие изменение значений абсолютной высоты с севера на юг
Second order partial derivative (E-W slope)	Производные второго порядка, представляющие изменение значений абсолютной высоты с востока на запад
Second order partial derivative (N-S slope)	Производные второго порядка, представляющие изменение значений абсолютной высоты с севера на юг
Geomorphological landforms (10 types: flat, peak, ridge, shoulder, spur, slope, hollow, footslope, valley, pit)	Геоморфологическая форма рельефа

В качестве предикторных переменных использовали различные наборы биоклиматических и эколого-географических данных, представленных в растровом формате:

- климатические переменные Worldclim (минимальная, максимальная и средняя температура каждого месяца (°C), сумма осадков для каждого месяца (мм), солнечная радиация (КДж/м²/день), скорость ветра (м/с), среднемесячная влажность воздуха (давление водяного пара, кПа);
- биоклиматические переменные Worldclim (см. табл. 1).
- экологические переменные ENVIREM (13) (см. табл. 2).
- растровые изображения EarthEnv, полученные с использованием данных дистанционного зондирования [3] (см. табл. 3), в том числе содержащие результаты классификации типов почвенно-растительного покрова [14] (табл. 4);

Все растровые изображения приведены к единому разрешению. Интервал между узлами сетки - 30" (1 км по дуге меридиана в линейной мере).

Таблица 4

Классификация типов почвенно-растительного покрова EarthEnv

Класс	Описание
1	Вечнозелёные и листопадные хвойные леса
2	Вечнозелёные широколиственные леса
3	Листопадные широколиственные леса
4	Смешанные леса
5	Кустарники
6	Луговая растительность
7	Сельскохозяйственные культуры
8	Регулярно затапливаемая растительность
9	Застроенные территории
10	Ледники
11	Пустоши
12	Открытая вода

Растровые слои, характеризующие естественную (реки) и антропогенную нарушенность ландшафтов (дороги и населённые пункты) получали с помощью инструмента Евклидово расстояние (Euclidean distance) в среде ArcGIS Pro. Таким образом, в результате были получены растровые изображения, каждая ячейка которых содержит информацию об удалённости каждой точки пространства от рек, дорог и населённых пунктов (рис. 1).

Первоначальное количество растровых изображений, используемых при моделировании пространственного распределения составило 153.



Рис. 1 Удалённость точек пространства от автомобильных дорог, полученная с помощью инструмента Euclidean distance (красным цветом обозначены территории, находящиеся на расстоянии 1 километра от автодорог).

Расчет коэффициент линейной корреляции (корреляции Пирсона) между растровыми изображениями проводили в R. Растровые изображения с коэффициентами корреляции между значениями, превышающими 0,75 считали скорелированными и исключали при дальнейшем анализе.

Результаты моделирования пространственного распределения чужеродных видов представлены в виде растровых картографических изображений, содержащих вероятностную оценку пригодности биоклиматических и эколого-географических факторов требованиям вида. Далее проводили дискретную классификацию полученных растровых изображений. С этой целью в качестве порогового значения использовали 10-ый процентиль. Значения ниже 10 процентиля считали, как неудовлетворяющие экологическим требованиям пришлых видов.

Оценку качества полученных моделей проводили с построением ROC-кривых (Receiver Operating Characteristic) и их AUC (Area Under Curve). Значение AUC равное 0,5 свидетельствуют о том, что прогноз пространственного распределения чужеродного вида, полученный в результате моделирования носит случайный характер. Значения AUC от 0,5 до 0,7 указывают на слабую связь, в то время как значения AUC от 0,7 до 1,0 свидетельствуют о существенной точности моделирования пространственного распределения вида.

Сравнение климатических и эколого-географических параметров мест произрастания в первичном и вторичном ареале Трахикарпуса проводили методом главных компонент с использованием библиотеки ggplot2 в R.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время случаев внедрения экземпляров трахикарпуса Форчуна (*T. fortunei*) в ненарушенные антропогенной деятельностью лесные экосистемы региона исследований не отмечено. Экземпляры трахикарпуса Форчуна активно распространяются в опушечных (краевых) зонах лесов, преимущественно располагающихся около населённых пунктов, несмотря на то, что растения этого вида на ювенильном этапе онтогенеза отличаются относительно высокой устойчивостью к затенению.

Моделирование показало, что наиболее заметный вклад в построение модели пространственного распределения *T. fortunei* внесли сумма осадков в самой сухой четверти года и показатель застроенности территории, полученный в результате классификация преобладающих типов почвенно-растительного покрова на основе ДДЗ (табл. 5).

Таблица 5

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl («глобальный ареал»), AUC=0.981

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
Сумма осадков в сухой четверти года, мм	17,8	3,5
EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»	12,0	1,6
Среднемесячная эвапотранспирация самой холодной четверти года, мм / месяц	9,5	6,1
Удалённость от автомобильных дорог, м	8,3	4,5
Сумма среднемесячных температур за месяцы со средней температурой выше 10°C умноженная на количество дней	7,4	0
Плювиотермический коэффициент Эмбергера	6,8	0
Сумма осадков в самый сухой месяц года, мм	6,8	0,6

Согласно использованным пространственным данным распространения экземпляров, *T. fortunei* в первичном ареале также предпочитает нарушенные и увлажнённые местообитания (табл. 6).

Таблица 6

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (первичный ареал), AUC=0.962

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»	15,6	1,5
Сумма осадков в самой теплой четверти года, мм	14,1	0
Сумма осадков в июне, мм	14,1	0
Температурная сезонность	11,5	0
Среднемесячная эвапотранспирация самой холодной четверти года, мм / месяц	11,4	1,8
Сумма осадков в июле, мм	10,5	0,3

Во вторичном ареале, включая Российское Причерноморье, наибольший вклад в построение модели распространения *T. fortunei* внесли сумма осадков в самой сухой четверти (табл. 7) и месяце (табл. 8) года, что согласуется с некоторыми данными о приуроченности вида к увлажнённым местообитаниям во вторичном ареале (Fehr V., Burga C., 2016).

Таблица 7

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (вторичный ареал), AUC=0.973

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
Сумма осадков в сухой четверти года, мм	28,2	0,7
Удалённость от автомобильных дорог, м	13,0	0,9
EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»	10,8	0,7
Среднемесячная эвапотранспирация самой холодной четверти года, мм / месяц	8,3	2,3
Сумма среднемесячных температур за месяцы со средней температурой выше 10°C умноженная на количество дней	7,6	0
Сумма осадков в октябре, мм	3,1	13,8

Таблица 8

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (вторичный ареал, Российское Причерноморье), AUC=0.958

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
Сумма осадков в самом сухом месяце года, мм	24,3	0
Сумма осадков в декабре, мм	15,7	0
EarthEnv, class 3 «Листопадные широколиственные леса»	6,7	0
Среднемесячная эвапотранспирация самой влажной четверти года, мм / месяц	5,9	5,8
Удалённость от автомобильных дорог, м	4,2	0

Вклад других переменных, включая топографические (уклон, экспозиция, выровненность поверхности и т.д.) при моделировании пространственного распределения *T. fortunei* оказался не существенным. Результаты моделирования пространственного распределения *T. fortunei*, свидетельствуют о том, что наиболее комфортные места для произрастания вида преимущественно находятся в прибрежной части региона исследований (рис 2).

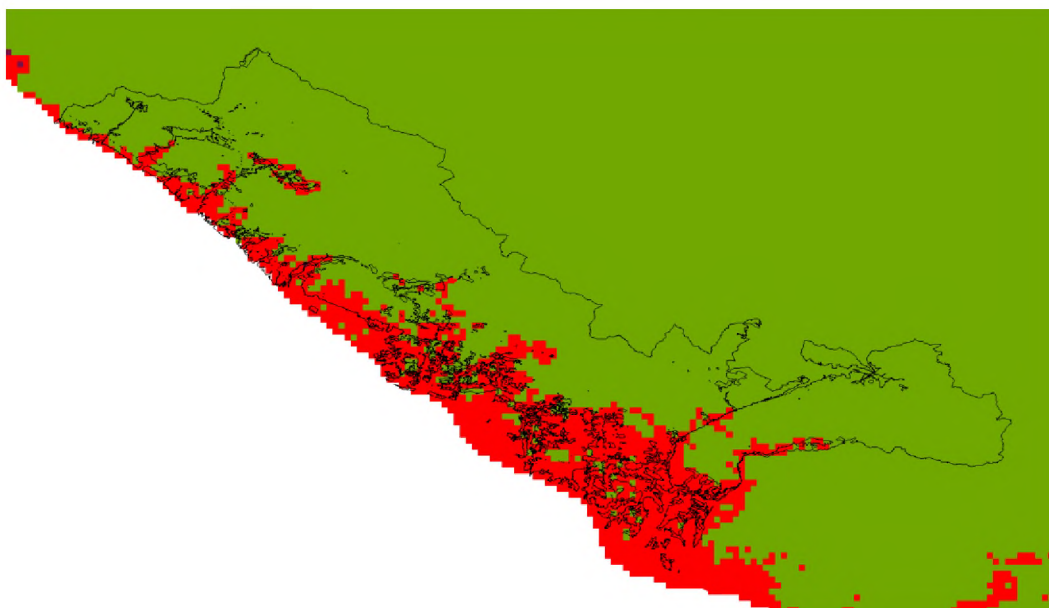


Рис. 2 Пространственное распределение мест пригодных для произрастания *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl.
Красным цветом изображены территории наиболее пригодные для произрастания вида.

Результаты использования метода главных компонент, иллюстрирующего роль наиболее значимых экологических факторов (сумма осадков в сухой четверти и застроенность территории) в распределении экземпляров вида в двухфакторном экологическом пространстве первичного и вторичного ареалов позволяют судить о нишевом сдвиге, который преимущественно проходит по оси PC1 (сумма осадков в сухой четверти года), т.е. во вторичном ареале *T. fortunei* стал осваивать более влажные условия произрастания (рис. 3).

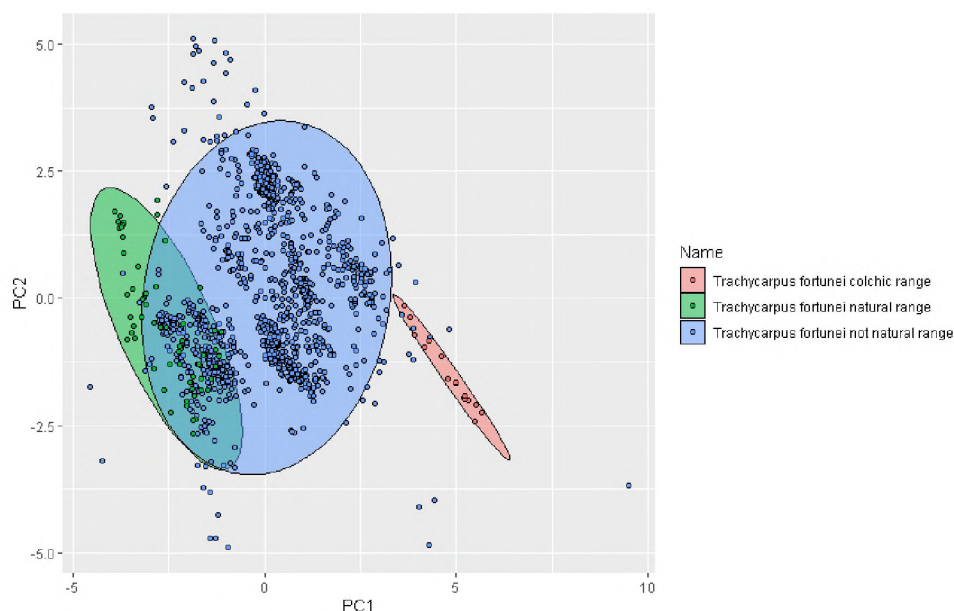


Рис. 3 Распределение точек наблюдений видов в первичном (зелёный цвет), вторичном (синий цвет), включая юг Российского Причерноморья (красный цвет) в экологическом пространстве двух факторов (PC1 – Сумма осадков в сухой четверти года, мм и PC2 – EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»), объясняющих 75,6% суммарной дисперсии.

В 2014 г. у *T. fortunei* в регионе исследований появился естественный враг *Paysandisia archon* Burmeister, выступающий в роли биотического фактора, ограничивающего распространения вида.

В некоторых регионах юга Европы с 2002 по 2012 гг. *P. archon* стал причиной гибели до 90% всех экземпляров *T. fortunei* [12]. В Большом Сочи на момент проведения исследований от южноамериканского пальмового бурильщика преимущественно пострадали экземпляры трахикарпуса Форчуна, произрастающие в прибрежной части города. Вопрос насколько уязвимы к нашествию насекомого-инвайдера экземпляры *T. fortunei*, произрастающие в более суровых условиях остаётся открытым.

Согласно результатам моделирования, наиболее заметный вклад в построение модели распространения *P. archon* в «глобальном» и первичном ареале внесли EarthEnv, class 9 «Застроенность территории» (классификация преобладающих типов почвенно-растительного покрова на основе ДДЗ) (табл. 9, 10).

Таблица 9

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Paysandisia archon* burmeister («глобальный ареал»), AUC=0.927

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»	25,6	0,2
Сумма осадков в самой холодной четверти года, мм	19,9	0
Сумма среднемесячных температур за месяцы со средней температурой выше 0°C умноженная на количество дней	18,2	37,6
Средняя температура марта (°C)	8,9	0

Таблица 10

Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в формирование области распространения *Paysandisia archon* burmeister (первичный ареал), AUC=0.883

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
EarthEnv, class 9 «Застроенность территории»	60,8	1,1
Средняя влажность воздуха в январе (парциальное давление водяного пара, кПа)	7,3	5,2
Среднее значение солнечная радиации (КДж/м ² /день) в декабре	6,8	0
Сумма осадков в январе, мм	5,4	0
Сумма осадков в самом сухом месяце года, мм	3,1	0

Во вторичном ареале наиболее лимитирующими факторами оказались осадки в сухой четверти года и средняя температура марта (табл. 11).

Таблица 11

Вклад биоклиматических в формирование области распространения *Paysandisia archon* burmeister (вторичный ареал), AUC=0.927

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
Сумма осадков в сухой четверти года, мм	38,6	3,5
Средняя температура марта (°C)	23,5	0,9
Сумма осадков в самой холодной четверти года, мм	13,0	0
Сумма среднемесячных температур за месяцы со средней температурой выше 0°C умноженная на количество дней	16,0	33,8
Средняя температура марта (°C)	9,1	0

В Российском Причерноморье наиболее заметный вклад в построение модели распространения *P. archon* вносят также переменные, связанные с сезонным распределением осадков (табл. 12).

Таблица 12

Вклад биоклиматических в формирование области распространения *Paysandisia archon burmeister* (вторичный ареал, Российское Причерноморье), AUC=0.709

Переменная / предиктор	Вклад в построение модели, %	Коэффициент перемутации.
Среднемесячная эвапотранспирация самой влажной четверти года, мм / месяц	26,4	18,8
Индекс засушливости Торнтвейта	8,9	0,1
Среднемесячная эвапотранспирация самой засушливой четверти года, мм / месяц	7,7	1,9

Результаты моделирования пространственного распределения *P. archon* в регионе исследований свидетельствует о том, что наиболее уязвимыми к поражению южноамериканским пальмовым бурильщиком являются экземпляры *T. fortunei*, преимущественно произрастающие в городской черте Большого Сочи (рис. 4).

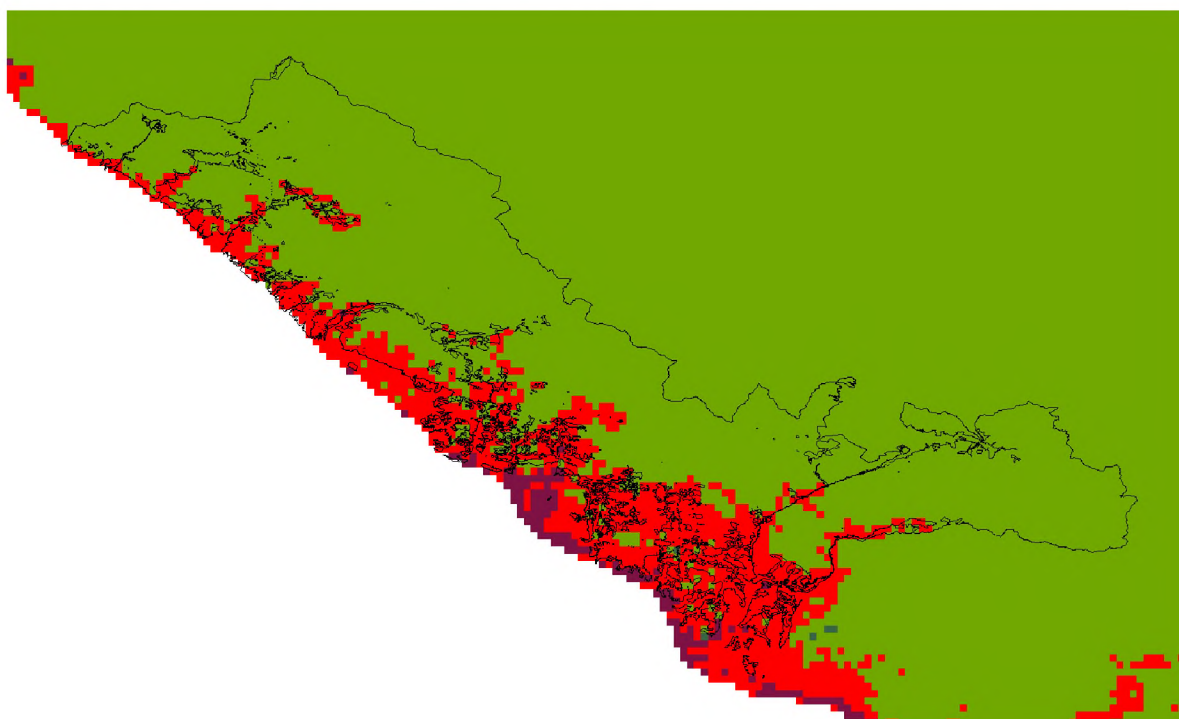


Рис. 4 Территории пригодные для произрастания *Trachycarpus fortunei* (Hook.) Н.Wendl (красный цвет), в том числе потенциально уязвимые к поражению *Paysandisia archon burmeister* (фиолетовый цвет).

Пространственное расположение экземпляров видов *T. fortunei* и *P. archon* в двухфакторном экологическом пространстве двух наиболее значимых экологических факторов (застроенность территории и сумма осадков в самой холодной четверти года), свидетельствует о том, что южноамериканский пальмовый бурильщик предпочитает места обитания, испытывающие более сильную антропогенную нагрузку, чем трахикарпус Форчуна (рис. 5).

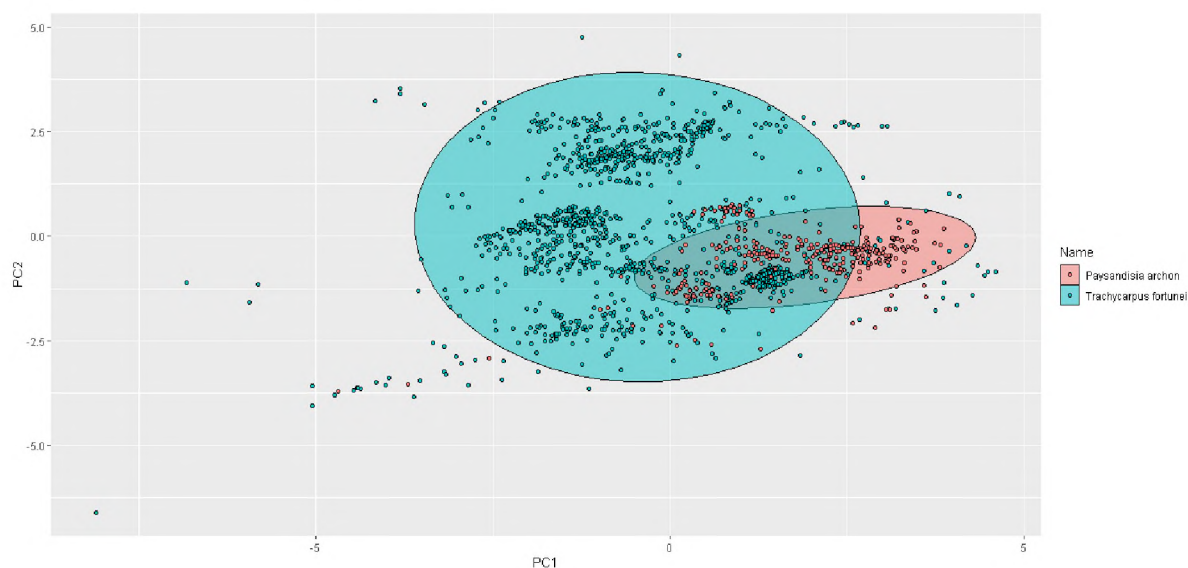


Рис. 5 Распределение точек наблюдений экземпляров видов *Paysandisia archon* Burmeister (красный цвет) и *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (аквамариновый Крайола) в экологическом пространстве двух факторов (PC1 — EarthEnv, class 9 «Застроенность территории» и PC2 - сумма осадков в самой холодной четверти года, мм), объясняющих 75,3% суммарной дисперсии

Заключение

Согласно использованным пространственным данным, *T. fortunei* в первичном ареале предпочитает нарушенные и увлажнённые местообитания. При этом во вторичном ареале трахикарпус Форчуна стал осваивать ещё более влажные условия произрастания.

Завезенный в 2014 г. в Сочи чужеродный вид насекомых - южноамериканский пальмовый бурильщик (*P. archon*) выступает в роли биотического фактора, ограничивающегося распространение трахикарпуса во вторичном ареале преимущественно в антропогенно трансформированных экосистемах.

Наиболее заметный вклад в построение модели распространения *P. archon* в «глобальном» и первичном ареале внесли EarthEnv, class 9 «Застроенность территории».

Во вторичном ареале наиболее лимитирующими факторами, ограничивающими распространение насекомого-вредителя, оказались переменные, связанные с сезонным распределением осадков.

Пространственное распределение экземпляров изучаемых видов в двухфакторном экологическом пространстве свидетельствует о том, что южноамериканский пальмовый бурильщик предпочитает места обитания, испытывающие более сильную антропогенную нагрузку, чем трахикарпус Форчуна.

Список литературы

1. Егошин А.В. Структура, состав и пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга Черноморского побережья Краснодарского края // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2021. – Vol. 6 (1). DOI: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2021-1-2>
2. Карпун Ю.Н. Сокровища парков Сочи. – Сочи, 1998. – 172 с.
3. Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M.-N., Parmentier, B., Ranipeta, A., Malczyk, J., and Jetz, W. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. Scientific. – 2018.

4. *Broennimann O., Guisan A.* Predicting current and future biological invasions: both native and invaded ranges matter // *Biology Letters*. – 2008. – № 4. – P.585-589.
5. *Callaway R.M., Maron J.L.* What have exotic plant invasion taught us over the past 20 years? // *Trends in Ecology and Evolution*. – 2006. – № 21. – P. 369-374.
6. *Fehr V., Burga C.* Aspects and causes of earlier and current spread of *Trachycarpus fortunei* in the forests of southern Ticino and northern Lago Maggiore (Switzerland, Italy). *Palms*. – 2016. – № 60. – P. 125-136.
7. *Mitchell C.E., Agrawal A.A., Bever, J.D., Gilbert G.S., Hufbauer R.A., Klironomos J.N.* et al. 2006. Biotic interactions and plant invasions // *Ecology Letters*. – Volume 9. – P. 726-740.
8. *Peterson A.T., Soberón J.* *Ecological Niches and Geographic Distributions / Monographs in Population Biology*. – 2011. – № 49. – P.315.
9. *Peterson, A.T., Vieglais, D.A.* Predicting species invasions using ecological niche modeling: New approaches from bioinformatics attack a pressing problem // *Bioscience*. – 2001. – № 51. – P.363-371.
10. *Pulliam H.R.* Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species // *Ecology Letters*. – 2007. – Volume 10. – Issue 12. – P.1115-1123
11. *Pulliam H.R.* On the relationship between niche and distribution // *Ecology Letters*. – 2000. – Volume 3. – Issue 4. – P. 349-361.
12. *Reid S. and Moran H.* Palm borer *Paysandisia archon* November // Department for Environment Food & Rural Affairs. – 2009. – P.4.
13. *Title P.O., Bemmels J.B.* ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*. – 2018. – № 41. – P.291-307.
14. *Tuanmu, M.-N. and W. Jetz.* A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modeling. *Global Ecology and Biogeography*. – 2014. – № 23(9). – P. 1031-1045.
15. *Cola V.D., Broennimann O.* Blaise Petitpierre ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions // *Ecography*. – 2016. – Volume 40. – Issue 6. – P. 774-787

Статья поступила в редакцию 30.06.2022 г.

Egoshin A.V. Modeling of the spatial distribution of *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl and *Paysandisia archon* Burmeister // *Bull. of the State Nikita Botan. Gard.* – 2022. – № 145. – P. 25-36.

Results of modeling of the spatial distribution of *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl and *Paysandisia archon* Burmeister are given. Predictor variables have made the most significant contribution to modeling the spatial distribution of *Trachycarpus fortunei* and *Paysandisia archon* are the amount and seasonal distribution of precipitation and the built-up area (EarthEnv, class 9). This species has begun to occupy wetter growing conditions in the secondary range than in its native range. The pest *Paysandisia archon* unintentionally introduced to the south of Russia's Black Sea Region, started to act as a biotic factor limiting its spread of *Trachycarpus fortunei* in the ecosystems of secondary range experiencing more significant anthropogenic impact.

Key words: alien species; invasions; Caucasus; modeling; species distributions modeling; SDM