

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ АГРЕССИВНЫХ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА ЮГЕ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ, НА ПРИМЕРЕ *PAULOWNIA TOMENTOSA* (THUNB.) STEUD И *CATALPA OVATA* G. DON

© 2024 Егошин А.В.

Сочинский национальный парк, Краснодарский край, г. Сочи, 354002, Российская Федерация
e-mail: avegoshin@gmail.com

Поступила в редакцию 03.05.2024. После доработки 30.07.2024. Принята к публикации 23.08.2024

Проведено моделирование пространственного распределения чужеродных древесных видов *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud, *Catalpa ovata* D. Don, активно распространяющихся в естественно-нарушенных лесных экосистемах юга Черноморского побережья Краснодарского края. Установлено, что оба вида приурочены к местам произрастания, обладающим схожими биоклиматическими и физико-географическими условиями. Территории наиболее комфортные для произрастания изучаемых видов располагаются преимущественно на высотных отметках до 550 м над уровнем моря, со среднегодовой температурой, превышающей 12 °С, и годовой суммой осадков в диапазоне 1400–1800 мм. Компонентный анализ 29 биоклиматических и эколого-географических переменных в местах произрастания экземпляров анализируемых видов свидетельствует о высоком влиянии климатических переменных на пространственное распределение экземпляров *Paulownia tomentosa* и переменных, характеризующих ландшафтные особенности местности – на пространственное распределение *Catalpa ovata*. При этом *Paulownia tomentosa* в условиях юга Черноморского побережья Краснодарского края способна занимать местообитания более разнообразные по температурному режиму чем *Catalpa ovata*. Установлено, что аборигенные древесные растения *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn, *Carpinus betulus* L., *Fagus orientalis* Lipsky, *Fraxinus excelsior* L, конкурирующие с *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata*, обладают большей экологической пластичностью. Высказано предположение, что нарушения растительного покрова являются необходимым условием для проникновения *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* в лесные экосистемы юга Черноморского побережья Краснодарского края.

Ключевые слова: фитоинвазии, Сочинский национальный парк, моделирование пространственного распределения видов, species distribution modeling, *Paulownia tomentosa* (Thunb.), *Catalpa ovata* D. Don
DOI:10.35885/1996-1499-17-3-086-101

Введение

Юг Черноморского побережья Краснодарского края характеризуется высоким уровнем геоморфологического и климатического разнообразия, что способствовало формированию здесь богатого уникального видового и экосистемного разнообразия [Туниев, 2023; Тимухин, 2023]. Ранее высказывалось предположение, что относительно полночленные экосистемы юга Российского Причерноморья с высоким уровнем биоразнообразия отличаются устойчивостью к внедрению чужеродных видов [Акатов и др., 2012; Егошин, 2021a], но последующее стремительное развитие региона, начавшееся с подготовки к

Зимним Олимпийским играм в Сочи в 2014 г., и не прекращающееся по сей день, способствовало появлению не только новых чужеродных видов, но и формированию неспецифичных для региона трансформированных экосистем с доминированием чужеродных видов. Особую роль в этих процессах играют чужеродные виды древесных растений *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Albizia julibrissin* Durazz., *Amorpha fruticosa* L., *Buddleja davidii* Franch, *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud, *Catalpa ovata* D. Don., *Robinia pseudoacacia* L. и др. При этом, под их пологом, как правило, появляются другие чужеродные виды растений (*Abutilon theophrasti* Medik., *Ambrosia*

artemisiifolia L., *Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino, *Bidens frondosa* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronqist, *Duchesnea indica* (Andrews) Focke, *Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus., *Microstegium japonicum* (Miq.) Koidz., *Phalacrocladus annuum* (L.) Dumort., *Paspalum dilatatum* Poir., *Phytolacca americana* L. и др.).

Несмотря на высокое разнообразие чужеродного компонента флоры региона [Tuniyev, Timukhin, 2017], подавляющее число чужеродных древесных видов растений способно внедряться в экосистемы лишь в случае антропогенного воздействия. Так, такие широко распространённые в регионе исследования виды, как *Ailanthus altissima* и *Robinia pseudoacacia* преимущественно отмечены в экосистемах, испытывающих в той или иной степени антропогенное воздействие. Способностью проникать в естественно-нарушенные лесные экосистемы региона (водотоки, вывалы деревьев) обладает незначительное число древесно-кустарниковых видов, из них наиболее агрессивными являются *Paulownia tomentosa*, *Catalpa ovata*, *Buddleja davidii*. При этом первые два вида зачастую успешно конкурируют в регионе исследований не только с аборигенными видами, но и между собой. Поэтому вышеупомянутые виды являются удобными объектами для изучения инвазионных процессов на юге Черноморского побережья Краснодарского края.

В настоящее время активно развивающиеся методы моделирования пространственного распределения (SDM – Species Distribution Modelling) являются эффективным инструментом, который позволяет выявлять экосистемы, наиболее уязвимые к внедрению чужеродных видов, главным образом, с использованием абиотических [Peterson, Soberón, 2011; Pabst et al., 2022] переменных, в том числе и характеризующих антропогенную нагрузку на экосистемы (удалённость экземпляров изучаемых видов от объектов инфраструктуры) [Егошин, 2023]. Кроме того, в настоящее время при моделировании пространственного распределения видов предпринимаются попытки использования и некоторых биотических переменных [Peterson, Soberón, 2012; Пшегусов, Чадаева, 2022, 2023], но пока эти переменные не от-

ражают всего спектра сложных биотических взаимодействий в экосистемах.

В настоящей статье предпринята попытка оценить уязвимость территории юга Российского Причерноморья к внедрению активно распространяющихся в естественно-нарушенных лесных экосистемах чужеродных древесных видов *Paulownia tomentosa*, и *Catalpa ovata*, выявить переменные, лимитирующие распространение этих видов, а также установить причины успешности изучаемых чужеродных видов в сравнении с аборигенными древесными видами региона исследований.

Родиной *P. tomentosa* являются восточные и центральные районы Китая. Ареал простирается к югу от изотермы 0 °С, с количеством выпадающих осадков 500–2500 мм. Павлония способна выдерживать максимальные температуры, достигающие 40 °С, но предпочитает территории с умеренным и субтропическим климатом, с оптимальной среднегодовой температурой 24–29 °С и среднегодовым количеством осадков 1000 мм [Booth, Jovanovic, 2000]. При этом указывается, что взрослые экземпляры способны выдерживать понижения температуры до –18 °С [Zhu, 1980].

Вид отличается исключительно высокой скоростью роста и высокой семенной продуктивностью. Растения начинают образовывать семена уже на 4–5-й год. На взрослом дереве может формироваться до 20 млн семян. При этом семена могут с лёгкостью переноситься в горных условиях на расстояние более 3 км. В почве они сохраняют всхожесть около 3 лет [Owfi, 2017]. В Китае *P. tomentosa* является сопутствующим компонентом листопадных мезофитных лесов, чаще предпочитает занимать долины рек, лощины, открытые и нарушенные местообитания, при этом совместно произрастая с такими древесными породами, как *Acer spp.*, *Fraxinus spp.*, *Castanea spp.*, *Tilia spp.*, а также соснами [Hu, 1959]. На юге Российского Причерноморья, натурализовавшаяся павлония, также предпочитает хорошо освещённые и нарушенные местообитания, совместно произрастая, преимущественно, с *Carpinus betulus* L., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Fagus orientalis* Lipsky, *Fraxinus*

excelsior L. *Castanea sativa* Mill. В антропогенно-нарушенных экосистемах, в отличие от естественно-нарушенных систем, в качестве содоминантов зачастую выступают и другие чужеродные виды древесно-кустарниковых растений азиатского происхождения, такие как *Ailanthus altissima*, *Buddleja davidii*, а также некоторые североамериканские виды (*Robinia pseudoacacia*, *Amorpha fruticosa*) [Егошин, 2021б, 2023].

В бассейне р. Шахе, второй по величине реки региона исследований, в качестве доминирующего вида в естественно-нарушенных экосистемах также присутствует и *Catalpa ovata*, успешно конкурируя с *Paulownia tomentosa*.

Родиной *C. ovata* также является центральный Китай, наибольшего обилия вид достигает в бассейне р. Янцзы [Park et al, 2010]. Первичный ареал во многом совпадает с ареалом павловнии, при этом взрослые экземпляры *C. ovata* способны выдерживать понижения температуры до -23.3 °С. Вид предпочитает хорошо освещённые местообитания с увлажнёнными и хорошо-дренированными почвами [Han et al., 2020].

Материал и методика

Регионом исследований является юг Черноморского побережья, включая территорию Сочинского национального парка и частично

Кавказского государственного природного биосферного заповедника (географические координаты региона исследований: 44.023572 с. ш., 39.149018 в. д.; 44.127237 с. ш., 39.431539 в. д.; 43.581294 с. ш., 40.659984 в. д.; 43.384885 с. ш., 39.994329 в. д.). В ходе проведения полевых исследований фиксировали географические координаты мест произрастания экземпляров чужеродных видов. Собранные данные были пространственно «прорежены» с использованием инструмента SDMtoolbox в ArcGIS. Дистанция прореживания между точками наблюдений чужеродных видов составила 1 км. В результате прореживания количество точек наблюдений составило: *Paulownia tomentosa* – 54, *Catalpa ovata* – 59, *Carpinus betulus* – 239, *Alnus glutinosa* – 193, *Fagus orientalis* – 174, *Fraxinus excelsior* – 190.

В качестве предикторных переменных использовали следующие наборы биоклиматических и эколого-географических переменных:

– Климатические переменные Worldclim (минимальная, максимальная и средняя температура каждого месяца (°С), сумма осадков для каждого месяца (мм), солнечная радиация (srad, КДж/м²/день), усреднённая скорость ветра на высоте 2 м над ур. моря (wind, м/с), среднемесячная влажность воздуха (давление водяного пара, кПа);

– Биоклиматические переменные Worldclim (табл. 1);

Таблица 1. Биоклиматические переменные BIOCLIM

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

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 тёплого месяца – средняя температура самого холодного месяца	°С
embergerQ	Плювиотермический коэффициент Эмбергера	–
growingDegDays0	Сумма среднемесячной температуры за месяцы со средней температурой выше 0 °С, умноженная на количество дней	–
growingDegDays5	Сумма среднемесячной температуры за месяцы со средней температурой более 5 °С, умноженная на количество дней	–
maxTempColdestMonth	Максимальная температура самого холодного месяца года	°С × 10
minTempWarmestMonth	Минимальная температура самого тёплого месяца года	°С × 10
monthCountByTemp10	Количество месяцев со средней температурой выше 10 °С	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	°С
tri	Индекс расчленённости рельефа	–
topoWet	SAGA-GIS топографический индекс влажности	–

Таблица 3. Физико-географические переменные EarthEnv

Переменная	Описание
elevation	Высота над уровнем моря
roughness	Расчленённость рельефа
tri	Индекс выровненности рельефа
tpi	Различия в высоте над уровнем моря ячейки с высотой над уровнем 8 соседних ячеек растрового изображения
vrm	Пересечённость рельефа с учётом трёхмерной ориентации ячеек растра в отношении друг к другу
aspectcos	Экспозиция (косинус угла)
aspectsin	Экспозиция (синус угла)
slope	Уклон
eastness	«Восточность» склона
northness	«Северность» склона
pcurv	Кривизна профиля
tcurv	Тангенциальная кривизна профиля
dx	Производная первого порядка изменения значений абсолютной высоты с востока на запад
dy	Производная первого порядка изменения значений абсолютной высоты с севера на юг
dxx	Производная второго порядка изменения значений абсолютной высоты с востока на запад
dyu	Производная второго порядка изменения значений абсолютной высоты с севера на юг
landform	Геоморфологическая форма рельефа (равнина, вершина, хребет, плечо, отрог, склон, ущелье, подножие склона, долина, котловина)

– Экологические переменные ENVIREM [Title, Bemmels, 2018] (табл. 2);

– Переменные EarthEnv, полученные с использованием данных дистанционного зондирования [Amatulli et al., 2018] (табл. 3), в том числе содержащие результаты классификации типов почвенно-растительного покрова [Tuanmu, Jetz, 2014] (табл. 4).

В качестве основных источников нарушений экосистем изучаемого региона выступают реки, дороги, ЛЭП и населённые пункты. Поэтому с помощью инструмента Евклидово расстояние (Euclidean distance) в среде ArcGIS были получены растровые изображения, характеризующие удалённость точек пространства от этих объектов.

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

Первоначальное количество переменных при анализе составило 99. Расчёт коэффициента линейной корреляции (корреляции Пирсона) между переменными проводили в R с использованием пакетов «raster» и «rgdal». Переменные с коэффициентами корреляции между значениями, превышающими 0.75 считали скоррелированными [Udovičić et al., 2007] и исключали при дальнейшем анализе.

Кроме того, для снижения степени коррелированности переменных провели тест Variance Inflation Factor (VIF) с использованием библиотеки usdm в R (порог $VIF \leq 10$). После исключения количество нескоррелированных переменных составило 29 (табл. 5).

Моделирование пространственного распределения экземпляров изучаемых чужеродных видов проводили в среде MaxEnt (Version 3.4.4) методом максимальной энтропии. Расчёты по каждому из видов производили в 10 повторностях, выполняя 500 итераций по каждому пикселю растровых изображений. Для каждого изучаемого вида 30% точек находок использовали в качестве тестовой выборки, 70% – в качестве обучающей.

Выбор оптимальных настроек MaxEnt был произведён на основе проверки многочисленных моделей в пакете R «ENMeval» [Muscarella et al., 2018] в R-Studio 2022.07.2 Build 576.

Наилучшее сочетание числовых признаков, количества фоновых точек и параметра множественной регуляризации определяли с помощью информационного критерия Акаике, его скорректированной формы (AICc) и разницы между ним и его минимальным значением ($\Delta AICc$). В общей сложности для каждого вида было построено девять моделей кандидатов (табл. 6, 7).

При моделировании и в среде MaxEnt были выбраны настройки, соответствующие минимальному значению AICc и $\Delta AICc = 0$ (fc.L_rm.3).

Для бинарного отображения результатов моделирования (присутствие или отсутствие) использовали 10 percentile training omission threshold.

Сравнение климатических и эколого-географических переменных мест произрастания изучаемых видов проводили с помощью

Таблица 4. Классификация типов почвенно-растительного покрова EarthEnv

Класс / Class	Описание
1	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

Таблица 5. Парные коэффициенты корреляции Пирсона и результаты теста VIF для переменных, использованных при анализе

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	VIF	
1	1.000	-0.318	0.343	0.581	-0.349	-0.057	0.136	-0.053	0.034	0.009	-0.135	-0.033	-0.133	-0.379	1.000	
2		1.000	0.075	-0.325	0.178	0.094	-0.552	0.007	-0.001	-0.024	0.035	0.031	0.078	0.335	5.452	
3			1.000	-0.232	-0.434	-0.040	0.275	-0.424	0.049	0.005	-0.114	-0.264	-0.281	-0.065	4.814	
4				1.000	-0.162	0.083	-0.020	0.444	-0.006	-0.021	-0.015	0.022	0.004	-0.204	2.691	
5					1.000	-0.155	-0.441	-0.216	-0.089	-0.011	0.083	0.436	0.429	-0.043	5.277	
6						1.000	-0.338	0.344	0.088	0.034	-0.006	-0.060	-0.061	0.177	2.428	
7							1.000	-0.277	-0.022	-0.014	-0.101	-0.261	-0.311	-0.114	4.379	
8								1.000	0.000	-0.046	0.142	-0.039	0.055	0.197	4.176	
9									1.000	0.060	-0.037	-0.031	-0.044	0.028	2.385	
10										1.000	0.031	0.042	0.079	-0.114	2.432	
11											1.000	-0.016	0.200	-0.015	1.440	
12												1.000	0.350	-0.178	4.046	
13													1.000	-0.063	2.713	
14														1.000	3.667	
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	VIF
1	-0.060	0.013	0.057	0.623	0.666	-0.128	-0.031	-0.001	-0.007	0.023	0.007	-0.041	-0.035	-0.252	-0.168	1.000
2	0.475	-0.071	0.019	-0.140	0.208	0.357	-0.010	-0.001	-0.009	0.022	0.015	0.021	-0.023	0.289	-0.003	5.452
3	0.238	0.043	0.031	-0.193	0.535	0.680	-0.019	0.011	-0.001	0.034	0.008	-0.052	-0.010	-0.023	-0.091	4.814
4	-0.237	-0.044	0.006	0.651	0.281	-0.521	-0.006	-0.005	-0.001	-0.009	-0.022	0.001	-0.014	-0.202	-0.061	2.691
5	0.040	-0.028	0.006	0.095	-0.583	-0.271	0.000	-0.022	-0.006	-0.037	-0.008	0.048	-0.012	0.096	0.054	5.277
6	-0.129	-0.083	-0.011	0.232	0.060	0.024	-0.004	0.021	0.022	0.043	0.013	0.015	-0.012	-0.008	0.084	2.428
7	-0.155	0.111	-0.015	-0.483	0.031	0.152	0.029	-0.003	-0.017	-0.027	-0.011	-0.044	0.061	-0.083	-0.020	4.379
8	-0.279	0.004	-0.017	0.369	-0.041	-0.388	0.013	-0.001	0.002	-0.013	-0.037	0.037	0.000	-0.043	0.023	4.176
9	0.014	-0.004	0.003	0.031	0.056	0.026	0.002	0.626	0.004	0.431	0.061	-0.002	0.004	-0.014	0.000	2.385
10	0.026	-0.008	0.007	0.012	0.014	-0.001	0.002	0.005	0.599	0.067	0.489	-0.002	0.003	-0.101	-0.014	2.432
11	-0.111	0.085	-0.008	-0.016	-0.133	-0.049	0.015	-0.047	0.077	-0.010	-0.006	0.034	0.005	0.026	0.011	1.440
12	-0.154	-0.009	-0.044	0.175	-0.211	-0.240	0.018	-0.018	0.040	-0.007	-0.007	0.054	0.001	0.068	0.022	4.046
13	-0.200	0.045	-0.029	0.162	-0.231	-0.170	0.006	-0.032	0.161	-0.019	-0.014	0.061	-0.019	0.005	0.059	2.713
14	-0.094	-0.011	-0.053	-0.221	-0.031	0.150	-0.009	0.019	-0.115	0.001	-0.028	0.004	-0.010	0.144	0.154	3.667

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	VIF
15	1.000	-0.043	-0.011	-0.149	0.104	0.228	-0.006	0.029	-0.020	0.024	0.044	-0.020	0.001	0.209	-0.160	5.667
16		1.000	0.004	-0.044	-0.071	-0.006	-0.001	-0.005	-0.007	-0.003	-0.003	-0.006	0.001	0.020	0.044	1.110
17			1.000	0.052	0.024	-0.003	-0.001	0.002	-0.001	0.007	0.012	-0.005	0.000	-0.010	-0.105	1.318
18				1.000	0.219	-0.479	-0.036	0.005	0.019	0.022	-0.005	0.009	-0.059	-0.182	-0.066	9.000
19					1.000	0.345	-0.037	0.009	-0.005	0.041	0.026	-0.051	-0.042	-0.132	-0.097	6.056
20						1.000	-0.008	0.007	-0.011	0.021	0.011	-0.031	0.000	0.068	-0.011	4.293
21							1.000	0.005	0.002	-0.002	-0.001	0.609	0.682	0.068	0.003	2.055
22								1.000	-0.011	0.031	0.006	0.002	0.004	0.007	0.002	1.940
23									1.000	0.005	0.038	0.003	0.000	-0.065	0.000	1.946
24										1.000	0.113	-0.004	0.000	-0.007	-0.018	1.388
25											1.000	-0.003	0.000	-0.045	-0.019	1.502
26												1.000	0.698	-0.006	-0.005	2.233
27													1.000	0.090	0.005	2.644
28														1.000	0.108	1.145
29															1.000	1.109

Примечание: 1 – bio1, 2 – bio2, 3 – bio8, 4 – bio9, 5 – bio12, 6 – bio15, 7 – wind4, 8 – strad7, 9 – aspectsin, 10 – aspectsos, 11 – EarthEnv(1), 12 – EarthEnv(3), 13 – EarthEnv(4), 14 – EarthEnv(6), 15 – EarthEnv(7), 16 – EarthEnv(8), 17 – EarthEnv(9), 18 – PETColdestQuarter, 19 – PETWarmestQuarter, 20 – PETWettestQuarter, 21 – dxx, 22 – dx, 23 – dy, 24 – eastness, 25 – northness, 26 – teurv, 27 – tri, 28 – rivers, 29 – roads.

Таблица 6. Входные данные и настройки девяти рассматриваемых моделей пригодности местообитаний и распределения *Rauiownia tomentosa* в условиях юга Черно-морского побережья Краснодарского края

Модель	AUC	AICc	$\Delta AICc$
fc.L gm.1	0.854978	1597.247	32.70288
fc.LQ gm.1	0.853637	1911.858	347.3138
fc.H gm.1	0.837639	1857.239	292.6952
fc.L gm.2	0.859181	1578.361	13.81657
fc.LQ gm.2	0.858779	1861.673	297.1289
fc.H gm.2	0.854867	1641.116	76.572
fc.L gm.3	0.860909	1564.544	0
fc.LQ gm.3	0.862196	1812.99	248.4462
fc.H gm.3	0.894619	1573.125	8.580689

Примечание: fc = вид функции (L = линейная, Q = квадратичная, LQ = линейно квадратичная), gm = регуляризационный множитель, AUC = площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций, AICc = скорректированный информационный критерий Акаике, $\Delta AICc$ – разница между AICc и его минимальным значением.

Таблица 7. Входные данные и настройки девяти рассматриваемых моделей пригодности местообитаний и распределения *Catalpa ovata* в условиях юга Черноморского побережья Краснодарского края

Модель	AUC	AICc	ΔAICc
fc.L_rm.1	0.888	1597.247	32.703
fc.LQ_rm.1	0.886	1911.858	347.314
fc.H_rm.1	0.905	1857.239	292.695
fc.L_rm.2	0.887	1578.361	13.817
fc.LQ_rm.2	0.885	1861.673	297.129
fc.H_rm.2	0.895	1641.116	76.572
fc.L_rm.3	0.885	1564.544	0
fc.LQ_rm.3	0.885	1812.990	248.446
fc.H_rm.3	0.890	1573.125	8.581

Примечание: fc = вид функции (L = линейная, Q = квадратичная, LQ = линейно квадратичная), gm = регуляризационный множитель, AUC – площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций, AICc – скорректированный информационный критерий Акаике, deltaAICc – разница между AICc и его минимальным значением.

метода главных компонент с использованием библиотеки FactoMineR [Lê et al., 2008]. Для визуализации использовали библиотеку ggplot2 [Wickham, 2016]. Долю перекрытия ниш получали, рассчитывая индекс Шенера [Schoener, 1968] с использованием пакета ENMtools [Warren et al., 2010].

Результаты и обсуждение

Число агрессивных чужеродных древесных видов растений, способных проникать в естественно-нарушенные экосистемы юга Черноморского побережья Краснодарского края, незначительно, тем не менее их роль в трансформации видового состава экосистем региона исследований может быть существенна. Наиболее активно внедряющимся в естественно-нарушенные лесные экосистемы являются *Paulownia tomentosa*, *Buddleja davidii*, и *Catalpa ovata*. Так появление *Paulownia tomentosa* в естественно-нарушенных лесных экосистемах пойм горных рек зачастую приводит к локальной трансформации видового состава экосистем, с расселением ряда чужеродных травянистых видов, а в условиях антропогенного воздействия и появлению и некоторых других чужеродных древесных видов, таких как *Ailanthus altissima*, *Robinia pseudoacacia* с формированием полностью трансформированных экосистем, где в качестве видов-эдификаторов выступают исключительно чужеродные виды (рис. 1).

В естественно-нарушенных лесных экосистемах малых водотоков из древесно-ку-

старниковых видов отмечено лишь присутствие преимущественно *Paulownia tomentosa*, *Catalpa ovata* и *Buddleja davidii*. При этом на отдельных участках водотоков первые два упомянутых вида конкурируют между собой.

Результаты компонентного анализа 29 биоклиматических и эколого-географических переменных в местах произрастания экземпляров изучаемых видов свидетельствуют о том, что климатические переменные оказывают большее влияние на пространственное распределение *Paulownia tomentosa*, чем переменные, характеризующие ландшафтные особенности местности. В то время, как для мест произрастания *Catalpa ovata* отмечена обратная закономерность.

Кумулятивная вариация трёх комплексных факторов компонентного анализа 29 биоклиматических и эколого-географических переменных в точках наблюдений экземпляров вида *Paulownia tomentosa* составляет 54.1%. Первая ось (Dim1), объясняющая 21.6% суммарной дисперсии, главным образом, представляет среднегодовую температуру (bio1), и среднюю суточную амплитуду температуры (bio2). Вторая ось (Dim2), объясняющая 18.1% суммарной дисперсии преимущественно представляет переменные, связанные с распределением осадков – годовую сумму осадков (bio12) и среднемесячную эвапотранспирацию самой холодной четверти года (petcoldestquarter). Третья ось (Dim3), объясняющая 14.4% суммарной дисперсии главным образом представляет физико-географи-



Рис. 1. Трансформированная лесная экосистема в пойме р. Мзымта с доминированием *Paulownia tomentosa* и содоминированием *Ailanthus altissima* в древесном ярусе, а также доминированием *Paspalum dilatatum* – в травяном.

ческие переменные – производную первого порядка изменения значений абсолютной высоты с востока на запад dx и экспозицию / синус угла (*aspectsin*) (табл. 8).

Кумулятивная вариация трёх комплексных факторов компонентного анализа биоклиматических и эколого-географических переменных в точках наблюдений экземпляров вида *Catalpa ovata* составляет 60.7%. Первая ось (*Dim1*), объясняющая 27.0% суммарной дисперсии, главным образом, представляет производную первого порядка изменений значений абсолютной высоты с севера на юг (dy) и экспозицию / косинус угла (*aspectcosine*). Вторая ось (*Dim2*), объясняющая 18.3% суммарной дисперсии преимущественно представляет солнечную радиацию в июле (*srad7*), среднегодовую температуру (*bio1*) и среднюю суточную амплитуду температуры (*bio2*). Третья ось (*Dim3*), объясняющая 15.4% суммарной дисперсии представляет, главным образом,

среднемесячную эвапотранспирацию самой влажной (*petwetterquarter*) и самой холодной (*petcoldestquarter*) четверти года, а также удалённость мест произрастания экземпляров вида от дорог (*roads*) (табл. 9).

Высокий вклад переменных среднегодовой температуры (*bio1*) и среднемесячной эвапотранспирации самой холодной четверти года (*petcoldestquarter*) был отмечен для обоих видов. При этом для вида *Catalpa ovata* отмечен более высокий вклад переменных, характеризующих различные ландшафтные характеристики местности, а также солнечной радиации и удалённости мест произрастания экземпляров вида от лесных дорог (*roads*).

Вид *Paulownia tomentosa*, в отличие от вида *Catalpa ovata*, в условиях юга Черноморского побережья Краснодарского края обладает большей экологической валентностью и способен занимать местообитания, несколько более разнообразные по температурному и световому режиму. Тем не менее,

Таблица 8. Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в точках наблюдений экземпляров вида *Paulownia tomentosa* в комплексные факторы компонентного анализа

Переменная	Dim 1	Dim 2	Dim 3
bio2	15.16	0.01	0.49
bio1	15.16	0.01	0.49
bio12	3.32	11.81	6.24
petcoldestquarter	1.52	11.58	6.78
dx	0.69	2.03	12.26
aspectsine	0.40	3.83	10.45
Дисперсия, %	21.6	18.1	14.4

Таблица 9. Вклад биоклиматических и эколого-географических переменных в точках наблюдений экземпляров вида *Catalpa ovata* (Thunb.) Steud. в комплексные факторы компонентного анализа

Переменная	Dim 1	Dim 2	Dim 3
dy	13.33	0.02	2.83
aspectcosine	5.61	0.10	7.52
srad7	1.00	17.68	0.54
bio1	0.11	14.95	1.48
petwetestquarter	2.66	5.12	13.52
petcoldestquarter	2.64	5.79	12.91
roads	3.04	0.73	12.16
Дисперсия, %	27.0	18.3	15.4

катальпа имеет более чётко-выраженную тенденцию к «захвату» более крутых склонов (aspectcosine), ориентированных с севера на юг (dy), нежели павловния. (рис. 2).

Paulownia tomentosa и *Catalpa ovata* в естественно-нарушенных лесных экосистемах региона исследований преимущественно занимают экологические ниши следующих аборигенных видов древесных растений: *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior*.

Результаты компонентного анализа свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на особенности распределения экземпляров групп конкурирующих видов в экологическом пространстве преимущественно оказывают средняя температуры самой сухой четверти года (bio9), среднемесячная эвапотранспирация самой холодной (petcoldestquarter) и самой тёплой (petwarmestquarter) четвертей года, а также скорость ветра в апреле месяце (wind4). При этом, анализируемые аборигенные виды, в отличие от чужеродных древесных видов, способны произрастать в условиях, характеризующихся более разнообразными

значениями средней суточной амплитуды температуры (bio2) и среднемесячной эвапотранспирации самой влажной четверти года (petwetestquarter) (рис. 3, 4).

Анализ данных пространственного распределения аборигенных и чужеродных видов в регионе исследований свидетельствует о том, что аборигенные виды древесных растений *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior* обладают большей экологической пластичностью (способностью произрастать в более широком диапазоне значений изучаемых экологических факторов), чем *Catalpa ovata*, и *Paulownia tomentosa*. Значения индексов перекрытия ниш чужеродных и аборигенных видов не превышают 0.41. При этом наибольшее перекрытие ниш наблюдается в парах аборигенных видов *Fagus orientalis* – *Carpinus betulus*, *Alnus glutinosa* – *Carpinus betulus* (табл. 10).

Тем не менее, несмотря на большую экологическую пластичность аборигенных видов, на отдельных участках лесных экосистем с подходящими биоклиматическими и эколого-географическими условиями, при наличии нарушений естественного растительного по-

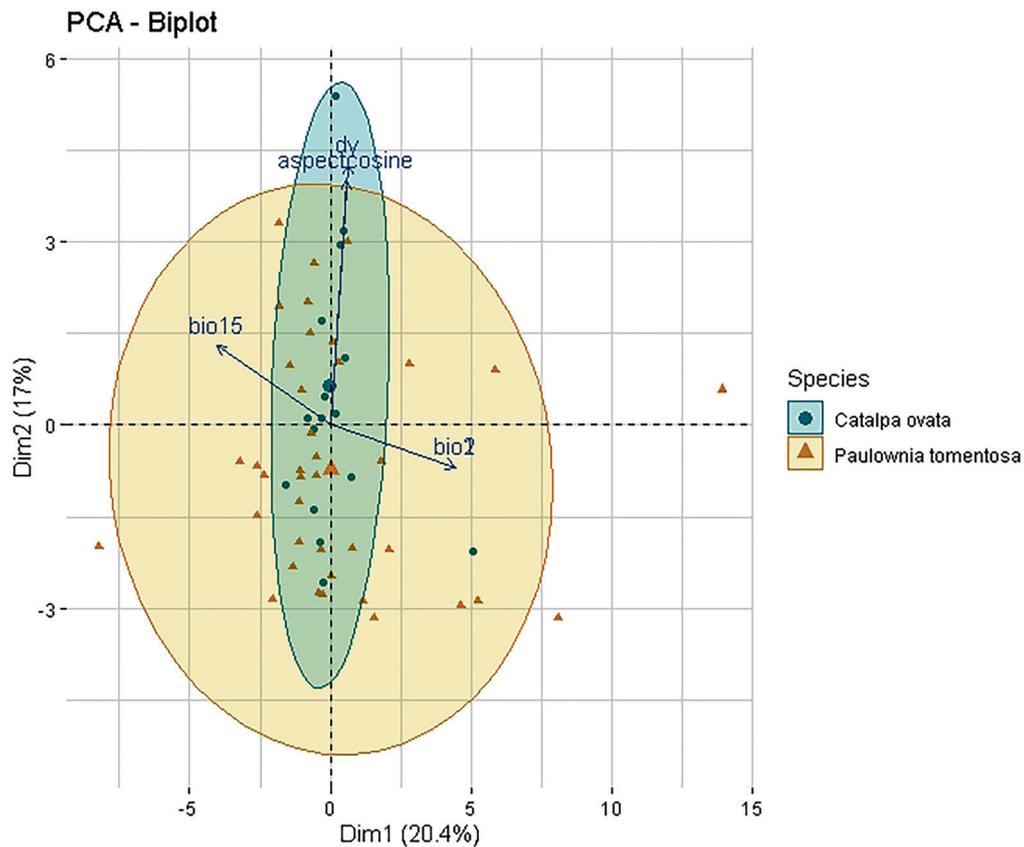


Рис. 2. Распределение точек наблюдений видов *Catalpa ovata* (синий цвет) и *Paulownia tomentosa* (оранжевый цвет) в экологическом пространстве двух факторов исследуемого региона, объясняющих 37.9% суммарной дисперсии. Первая ось, объясняющая 20.4% суммарной дисперсии, главным образом, представляет переменные среднегодовой температуры (bio1) и средней суточной амплитуды температуры (bio2). Вторая ось, объясняющая 17% суммарной дисперсии, главным образом, представляет переменные, характеризующие ландшафтные характеристики мест произрастания обоих чужеродных видов (dy – производная первого порядка изменения значений абсолютной высоты с севера на юг, aspectcosine – экспозиция / косинус угла, dx – производная второго порядка изменения значений абсолютной высоты с востока на запад).

крова, *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* получают конкурентное преимущество. Это происходит во многом благодаря биологическим особенностям, которые свойственны многим чужеродным видам, выражающимся в высокой скорости роста, плодовитости, а также неприхотливости к почвенным условиям [Owfi, 2017; Han et al., 2020]. По-видимому, регенерационные ниши обоих анализиру-

емы чужеродных видов на юге Российского Причерноморья также ограничены факторами естественной (реки, вывалы деревьев) и антропогенной (вырубки, дороги, застройка территории) нарушенности экосистем.

Следует отметить, что *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* являются видами начальных стадий сукцессий на своей родине [Hu, 1959; Park et al., 2010]. По-видимому, аналогичным

Таблица 10. Значения индекса перекрытия экологических ниш Schoener's D для анализируемых видов

Вид	<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Catalpa ovata</i>	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Carpinus betulus</i>	<i>Fagus orientalis</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>
<i>Paulownia tomentosa</i>	1	0.56	0.40	0.41	0.32	0.17
<i>Catalpa ovata</i>	0	1	0.38	0.37	0.28	0.17
<i>Alnus glutinosa</i>	–	–	1	0.70	0.65	0.50
<i>Carpinus betulus</i>	–	–	–	1	0.75	0.57
<i>Fagus orientalis</i>	–	–	–	–	1	0.57
<i>Fraxinus excelsior</i>	–	–	–	–	–	1

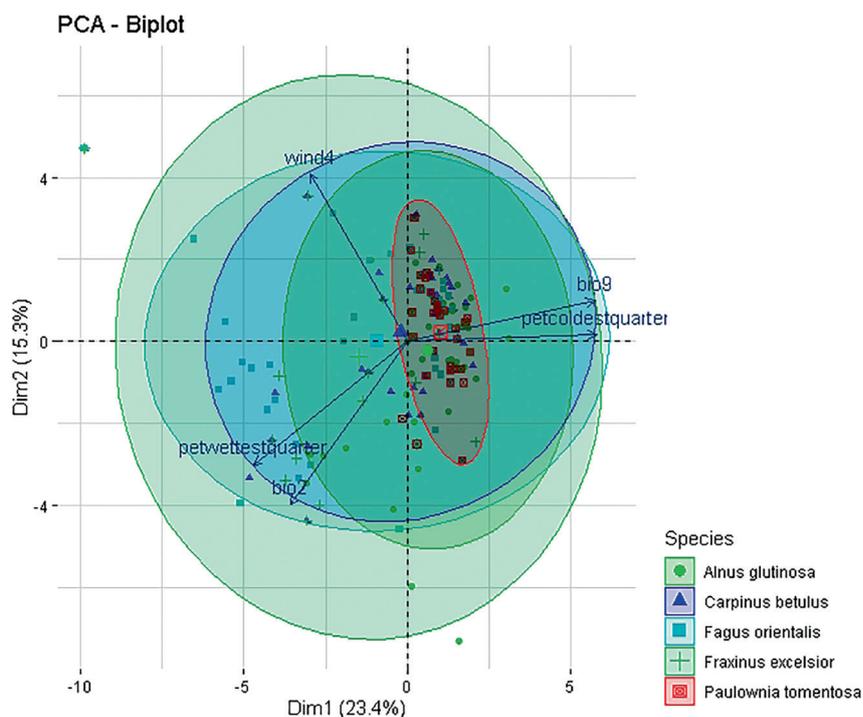


Рис. 3. Компонентный анализ биоклиматических и эколого-географических переменных в местах присутствия чужеродных видов *Paulownia tomentosa*, а также аборигенных видов *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior*. Первая ось, объясняющая 23.4% суммарной дисперсии, главным образом, представляет переменные средней температуры самой сухой четверти года (bio9), а также среднемесячной эвапотранспирации самой холодной (petcoldestquarter) и самой тёплой (petwarmestquarter) четвертей года. Вторая ось, объясняющая 15.3% суммарной дисперсии, главным образом представляет переменные скорости ветра в апреле месяце (wind4) и среднемесячной эвапотранспирации самой тёплой четверти года (petwarmestquarter).

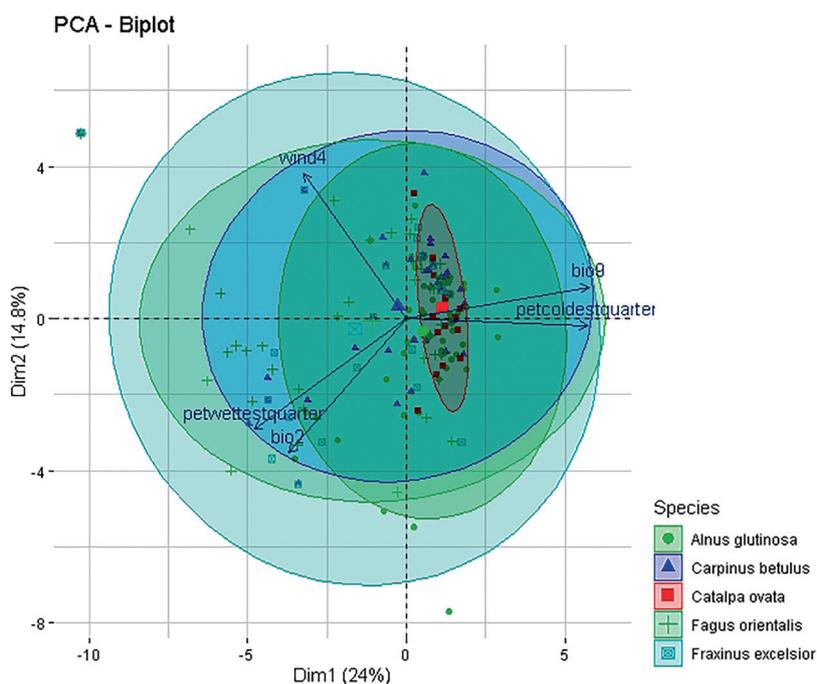


Рис. 4. Компонентный анализ биоклиматических и эколого-географических переменных в местах присутствия чужеродных видов *Catalpa ovata*, а также аборигенных видов *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior*. Первая ось, объясняющая 24% суммарной дисперсии, главным образом, представляет переменные средней температуры самой сухой четверти года (bio9), среднемесячной эвапотранспирации самой холодной (petcoldestquarter) и самой влажной четверти года (petwettestquarter). Вторая ось, объясняющая 14.8% суммарной дисперсии, главным образом, представляет переменные скорости ветра в апреле месяце (wind4), среднемесячной эвапотранспирации самой тёплой четверти года (petwarmestquarter) и производной второго порядка изменения значений абсолютной высоты с востока на запад (dxx).

Таблица 11. Вклад переменных среды в формирование области распространения *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata*

Переменная	<i>Paulownia tomentosa</i>		<i>Catalpa ovata</i>	
	Вклад, %	Важность при перемутации, %	Вклад, %	Важность при перемутации, %
Годовая сумма осадков (bio12)	48.6	41.9	44.3	12.3
Среднемесячная эвапотранспирация самой тёплой четверти года (petwetttestquarter)	28.8	4.1	34.2	84.6
Средняя температура самой сухой четверти года (bio9)	12.5	52.8	2.6	0.5
Удалённость от водотоков (rivers)	2.4	0.6	8.5	1.2

образом ведут себя эти виды и на юге Черноморского побережья Краснодарского края, выступая в качестве «истинных эксплерентов», замещая виоленты в результате нарушений мест произрастаний. Тем не менее, факт распространения чужеродных видов, даже в нарушенных экосистемах особо охраняемых природных территорий, не может не вызвать опасений.

Результаты моделирования пространственного распределения *Paulownia tomentosa*

и *Catalpa ovata* методом максимальной энтропии также указывают на высокий вклад переменных, связанных с сезонным распределением осадков (табл. 11).

При этом существенная часть территории изучаемого региона в климатическом и эколого-географическом отношении в значительной степени уязвима к внедрению обоих древесных чужеродных видов. При этом территории, наиболее уязвимые к внедрению

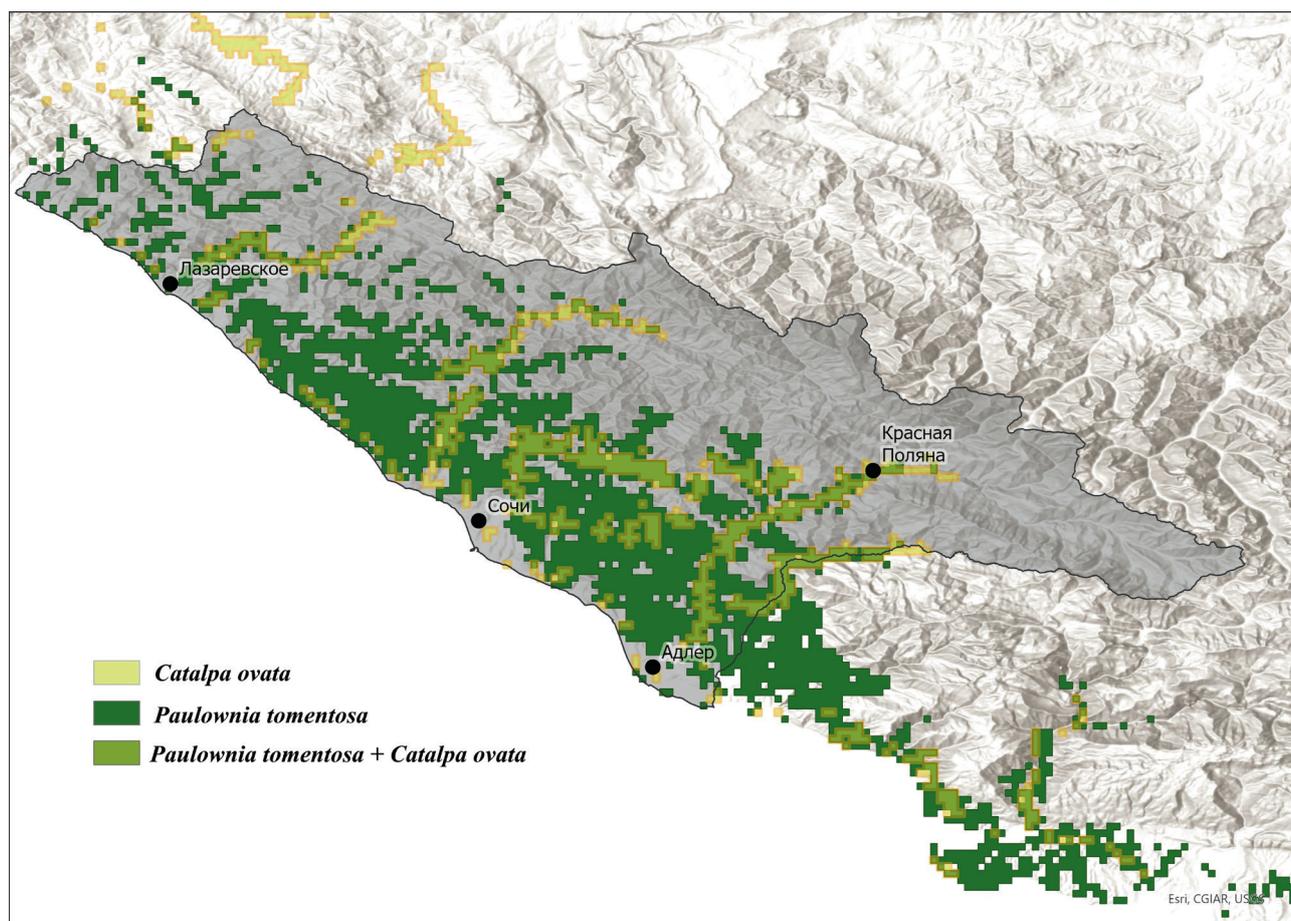


Рис. 5. Карта пригодности мест произрастания *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* на юге Российского Причерноморья, построенная с помощью моделирования методом максимальной энтропии с использованием в качестве порога 10-percentile training presence logistic thresholds. Тёмно-серой линией обозначены административные границы Большого Сочи.

Catalpa ovata, располагаются преимущественно в долинах крупных рек региона (рис. 5).

Согласно полученным данным, территории наиболее комфортные для произрастания обоих видов располагаются преимущественно на высотных отметках, не превышающих 550 м над ур. моря, с оптимальной годовой суммой осадков в диапазоне 1400–1800 мм для павловнии и 1400–1650 мм для катальпы.

Заключение

Климатические переменные, оказывают наибольшее влияние на пространственное распределение *Paulownia tomentosa*. При этом для вида *Catalpa ovata* отмечен наиболее высокий вклад переменных, характеризующих различные ландшафтные характеристики местности, а также удалённость мест произрастания экземпляров вида от лесных дорог.

Вид *Paulownia tomentosa*, в отличие от вида *Catalpa ovata*, в условиях юга Черноморского побережья Краснодарского края обладает большей экологической валентностью и способен занимать местообитания более разнообразные по температурному и световому режиму. Тем не менее *Catalpa ovata* имеет более чётко выраженную тенденцию к «захвату» более крутых склонов южного направления, нежели павловния.

Paulownia tomentosa и *Catalpa ovata* в нарушенных экосистемах региона исследований преимущественно занимают экологические ниши аборигенных древесных растений: *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior*.

Анализ данных о пространственном распределении аборигенных и чужеродных видов в регионе исследований свидетельствуют о том, что аборигенные виды древесных растений *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus*, *Fagus orientalis*, *Fraxinus excelsior* обладают большей экологической пластичностью (способностью произрастать в более широком диапазоне значений анализируемых экологических факторов), чем *Catalpa ovata* и *Paulownia tomentosa*. При этом анализируемые аборигенные виды, более адаптированные к автохтонному ареалу, в отличие от чужеродных древесных видов, способны произрастать в условиях, характе-

ризующихся более разнообразными значениями средней суточной амплитуды температуры и среднемесячной эвапотранспирации самой влажной четверти года. Значения индексов перекрытия ниш чужеродных и аборигенных видов не превышают 0.41.

Значительная часть территории изучаемого региона в климатическом и эколого-географическом отношении в значительной степени уязвима к внедрению обоих древесных чужеродных видов. При этом наиболее уязвимыми к внедрению анализируемых чужеродных видов являются участки леса, располагающиеся преимущественно в долинах крупных рек региона исследований.

Финансирование работы

Исследования проведены в рамках НИР «Современное состояние и антропогенная трансформация флористического разнообразия Сочинского национального парка» (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 122111000023-1)

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных автором.

Литература

- Акатов В.В., Акатова А.Е., Шадже А.Е. Видовое богатство древесного и кустарникового ярусов прирусловых лесов Западного Кавказа с доминированием инородных видов // Экология. 2012. Т. 4. С. 276–283 [Akotov V.V., Akatova A.E., Shadzhe A.E. Species richness of the tree and shrub layer of streamside forests of the Western Caucasus dominated by foreign species // Ecology. 2012. Vol. 4. P. 276–283].
- Егошин А.В. Структура, состав и пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга Черноморского побережья Краснодарского края // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2021a. Т. 6 (1). С. 1–15 [Egoshin A.V. Structure, composition and spatial distribution of alien component of the flora of the southern Black Sea coast of Krasnodar Territory // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2021a. Vol. 6 (1). P. 1–15].
- Егошин А.В. Моделирование пространственно-временного распределения чужеродных видов растений с использованием данных дистанционного зондирова-

- ния, на примере *Paulownia tomentosa* // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П. Г. Смидовича. 2021б. Т. 28. С. 83–94 [Egoshin A.V. Modeling the spatial and temporal distribution of *Paulownia tomentosa* using remotely sensed data // Proceedings of the Mordovian State Nature Reserve. 2021b. Т. 28. P. 83–94].
- Егошин А.В. Чужеродный компонент флоры Сочинского национального парка и закономерности его формирования // Сочинскому национальному парку – 40 лет: Юбилейный сборник научных трудов. 2023. С. 166–191 [Egoshin A.V. Alien component of the flora of Sochi National Park and regularities of its formation // Proceedings of the Sochi National Park. 2023. P. 166–191].
- Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Моделирование экологических ниш видов рода *Galinsoga* Ruiz et Pav. в границах нативного и кавказской части инвазионного ареалов // Российский журнал биологических инвазий. 2022. № 1. С. 107–122. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-1-107-122> [Pshegusov R.Kh., Chadaeva V.A. Modeling of ecological niches of species of the genus *Galinsoga* Ruiz et Pav. within the boundaries of native and Caucasian parts of invasive ranges // Russian Journal of Biological Invasions. 2022. Vol. 1. P. 107–122. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-1-107-122>]
- Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Комплексный подход учёта экологических факторов в моделях современного распространения *Ambrosia artemisiifolia* L. на Кавказе // Российский журнал биологических инвазий. 2023. № 1. С. 149–167. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-149-167> [Pshegusov R.H., Chadaeva V.A. Integrated approach to accounting environmental factors in models of the current distribution and climatic dynamics of *Ambrosia artemisiifolia* L. in the Caucasus // Russian Journal of Biological Invasions. 2023. Vol. 1. P. 149–167. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-3-149-167>]
- Тимухин И.Н. Дополнения к флоре сосудистых растений Сочинского национального парка за период исследований 2018–2022 годов // Сочинскому национальному парку – 40 лет. Юбилейный сборник научных трудов. 2023. С. 149–166 [Timukhin I.N. Additions to the flora of vascular plants of Sochi National Park for the period of research 2018–2022 // Proceedings of the Sochi National Park. 2023. P. 149–166].
- Туниев Б.С. Эксклюзивная роль Сочинского национального парка в сохранении биоразнообразия природной флоры и фауны России // Сочинскому национальному парку – 40 лет. Юбилейный сборник научных трудов. 2023. С. 13–43 [Tuniev B.S. Exclusive role of Sochi National Park in preserving the biodiversity of natural flora and fauna of Russia // Proceedings of the Sochi National Park. 2023. P. 13–43].
- 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. Vol. 5: 180040.
- Booth T.H., Jovanovic T. Improving descriptions of climatic requirements in the CABI Forestry Compendium. A report for the Australian Centre for International Agricultural Research. CSIRO - Forestry and Forest Products. 2000. Client Report No. 758.
- Han Y., Shuaiwei D., Zhiyong S., Yaoming W., Xuefeng L., Bo C., Guanzhong Y., Yang G., Chunxia L., Dongfang Z., Yong Z., Ting W., Shuangxi Y., Wanxi. P. *Catalpa ovata* G. Don. Potential medicinal value of leaves // Thermal Science. 2020 Vol. 24. P. 1713–1720. <https://doi.org/10.2298/TSCI190609043Y>.
- Hu, Shiu-Ying. A monograph of the genus *Paulownia* // Quarterly Journal of the Taiwan Museum. 1959. Vol. 12 (1–2). P. 1–54.
- Lê S., Josse J. & Husson F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis // Journal of Statistical Software. 2008. 25 (1). P. 1–18.
- Muscarella R., Galante P.J., Soley-Guardia M., Boria R.A., Kass J.M., Uriarte M., Anderson R.P. Package ‘ENMeval’, version 0.3.0. Automated Runs and Evaluations of Ecological Niche Models. 2018. Vol 26. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.40>
- Owfi Reza. Ecophysiological study of *Paulownia tomentosa* // International Journal of Current Research. 2017. Vol. 9. P. 63582–63591.
- Pabst Rebecca, Filipe S. Dias, Borda de Agua Luis, Rodríguez-González Patricia, Capinha César. Assessing and Predicting the Distribution of Riparian Invasive Plants in Continental Portugal // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. Vol. 10: 875578. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.875578>.
- Park B.M., Hong S.S., Lee C., Lee M.S., Kang S.J., Shin Y.S., Jung J.-K., Hong J.T., Kim Y., Lee M.K., et al. Naphthoquinones from *Catalpa ovata* and their inhibitory effects on the production of nitric oxide // Arch Pharm Res. 2010. Vol. 33 (3). P. 381–385.
- Peterson A.T., Soberón J. Ecological Niches and Geographic Distributions // Monographs in Population Biology. 2011. Vol. 49. 315 p.
- Peterson A., Soberón J. Species Distribution Modeling and Ecological Niche Modeling: Getting the Concepts Right // Natureza e Conservação. 2012. Vol. 10 (2). P 1–6. <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>.
- Schoener T.W. *Anolis* lizards of Bimini: resource partitioning in a complex fauna // Ecology. 1968. Vol. 49. P. 704–726.
- 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. Vol. 4. P. 291–307.
- Tuanmu M., Jetz W. A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modeling // Global Ecology and Biogeography. 2014. Vol. 23 (9). P. 1031–1045.
- Tuniev B.S., Timukhin I.N. Species composition and comparative-historical aspects of expansion of alien species of vascular plants on the Sochi Black Sea Coast (Russia) // Nature Conservation Research. 2017. Vol. 2 (4). P. 2–25.
- Udovičić M., Baždarić K., Bilic-Zulle L., Petrovecki Mladen. What we need to know when calculating the coefficient of correlation? // Biochemia Medica. 2007. Vol. 17. P. 5–10. <https://doi.org/10.11613/BM.2007.002>.

Warren D., Glor R., Turelli M. ENMTools: A toolbox for comparative studies of environmental niche models // *Ecography*. 2010. Vol. 33. P. 607–611. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06142.x>

Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.

Zhu Z.H. *Research on Paulownia*. Beijing, China: China Agriculture Press, 1980. Vol. 19. No. 4.

MODELING OF SPATIAL DISTRIBUTION OF THE MOST AGGRESSIVE ALIEN SPECIES OF WOODY PLANTS (*PAULOWNIA TOMENTOSA* (THUNB.) STEUD AND *CATALPA OVATA* G. DON) IN THE SOUTH OF THE BLACK SEA COAST OF KRASNODAR TERRITORY

© 2024 Egoshin A.V.

Sochi National Park, Krasnodar Region, Sochi, 354002, Russian Federation
e-mail: avegoshin@gmail.com

The spatial distribution of the most aggressive alien woody species (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud, *Catalpa ovata* D. Don) on the southern Black Sea coast of Krasnodar Territory was studied. It has been found that both species are confined to habitats with similar bioclimatic and physical and geographic environmental conditions. The places most suitable for the growth of the studied species are located mainly at altitudes up to 550 meters above the sea level, with an average annual temperature exceeding 12 °C and annual precipitation in the range of 1400–1800 mm. Component analysis of 30 bioclimatic and ecological and geographical variables in the locations of specimens of the analyzed species indicates a high influence of climatic variables on the spatial distribution of *Paulownia tomentosa* (Thunb.) and variables characterizing landscape features of the area on the spatial distribution of *Catalpa ovata* D. Don. At that, *Paulownia tomentosa* (Thunb.) can occupy a wider range of habitats in terms of temperature regime compared to *Catalpa ovata* D. Don in conditions of the southern Black Sea coast of Krasnodar Territory. It has been found that native woody plants *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn, *Carpinus betulus* L., *Fagus orientalis* Lipsky, *Fraxinus excelsior* L., which compete with *Paulownia tomentosa* (Thunb.) and *Catalpa ovata* D., have greater ecological plasticity. Disturbance of the natural vegetation cover is a prerequisite for the introduction of *Paulownia tomentosa* (Thunb.) and *Catalpa ovata* D. Don into the forest ecosystems of the southern Black Sea coast of Krasnodar Territory.

Keywords: phytoinvasions, Sochi National Park, species distribution modeling, Sochi National Park, spatial distribution modeling, *Paulownia tomentosa*, *Catalpa ovata*.