

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ АГРЕССИВНЫХ ВИДОВ ЧУЖЕРОДНОГО КОМПОНЕНТА ФЛОРЫ НА ЮГЕ РОССИЙСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ

А.В. Егошин

*Сочинский национальный парк, ул. Московская, д. 21, г. Сочи, 354000, Россия.*

*E-mail: avegoshin@gmail.com*

*ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7862-234X>*

**Ключевые слова:** *чужеродные виды, инвазии, фитоинвазии, Сочинский национальный парк, SDM, моделирование*

**Аннотация.** Приведены результаты моделирования пространственного распределения наиболее агрессивных чужеродных видов растений в Сочинском национальном парке. Установлены факторы, вносящие наиболее весомый вклад в распространение наиболее агрессивных видов-вселенцев во вторичном ареале. Оценено влияние климатических изменений на современный пул чужеродных видов.

## MODELING OF SPATIAL DISTRIBUTION OF THE MOST AGGRESSIVE SPECIES OF THE ALIEN FLORA COMPONENT IN THE SOUTH OF THE RUSSIAN BLACK SEA REGION

A.V. Egoshin

*Sochi National Park, 21 Moskovskaya St., Sochi, 354000, Russian Federation.*

**Keywords:** *alien species, invasions, invasive species, Sochi National Park, SDM, modeling*

**Summary.** The results of modeling the spatial distribution of the most aggressive alien plant species in Sochi National Park are presented. Factors contributing most significantly to the distribution of the most aggressive invasive alien species in secondary habitats have been identified. The influence of climatic changes on the modern pool of alien species was assessed.

Юг Российского Причерноморья характеризуется высоким уровнем геоморфологического и климатического разнообразия, что в прошлом способствовало формированию здесь богатого уникального экосистемного и видового разнообразия. Так на территории одного лишь Сочинского национального парка число видов сосудистых растений превышает 2200 (Туниев, 2023; Тимухин, 2023).

Геоморфологическое и климатическое разнообразие региона продолжает играть существенную роль в изменении видового состава флоры региона и в настоящее время, но уже путём заноса новых экзотических видов растений. При этом беспрецедентный рост антропогенной нагрузки в регионе значительно ускоряет этот процесс.

Общее количество чужеродных видов растений, натурализовавшихся в экосистемах юга Российского Причерноморья различной степени нарушенности превышает 167 (Tuniyev, Timukhin, 2017), но не смотря на разнообразие чужеродного компонента флоры, подавляющее число пришлых видов способно внедряться в экосистемы лишь в случае какого-либо антропогенного нарушения.

Число чужеродных древесно-кустарниковых видов, которые активно распространяются как в естественно, так и антропогенно нарушенных экосистемах не превышает 20.

При этом на некоторых участках изучаемого региона отмечено формирование трансформированных экосистем, эдификаторами в которых выступают исключительно пришлые виды. Наиболее ярким примером таких сообществ являются насаждения с

доминированием павловнии войлочной (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.) в бассейне реки Мзымта – самой длинной реки Большого Сочи и Сочинского национального парка.

Процесс строительства автомобильной и железной дороги Адлер – Красная Поляна в бассейне реки сопровождался элиминацией древесно-кустарникового яруса экосистем практически на всём протяжении этого линейного объекта. Следует отметить, что ранее в состав сохранившихся насаждений низкогорной и среднегорной форм рельефа зачастую входил самшит колхидский (*Buxus colchica* Pojark.), который был уничтожен в результате инвазии самшитовой огнёвки (*Cydalima perspectalis* Walker). Все эти процессы способствовали формированию нетипичных для района исследований насаждений, в которых в качестве эдификаторов выступают чужеродные виды, в первую очередь - *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud и *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle (рис. 1). При этом на отдельных участках отмечено проникновение *Paulownia tomentosa* вглубь лесного массива от дорожной инфраструктуры в среднем на 30 метров, *Ailanthus altissima* – не далее 14 метров. Изученная трансформированная экосистема, располагающаяся на надпойменной террасе левого берега реки Мзымта, на высоте 136 метров над уровнем моря (43.5740730N, 40.0082650E), граничит с естественной экосистемой, представляющей собой грабо-букняк самшитовый, в травянистом покрове которого доминирует остянка курчаволистная (*Oplismenus undulatifolius* (Ard.) P. Beauv.) (40%) и недотрога обыкновенная (*Impatiens noli-tangere* L.) (20%) (табл. 1).

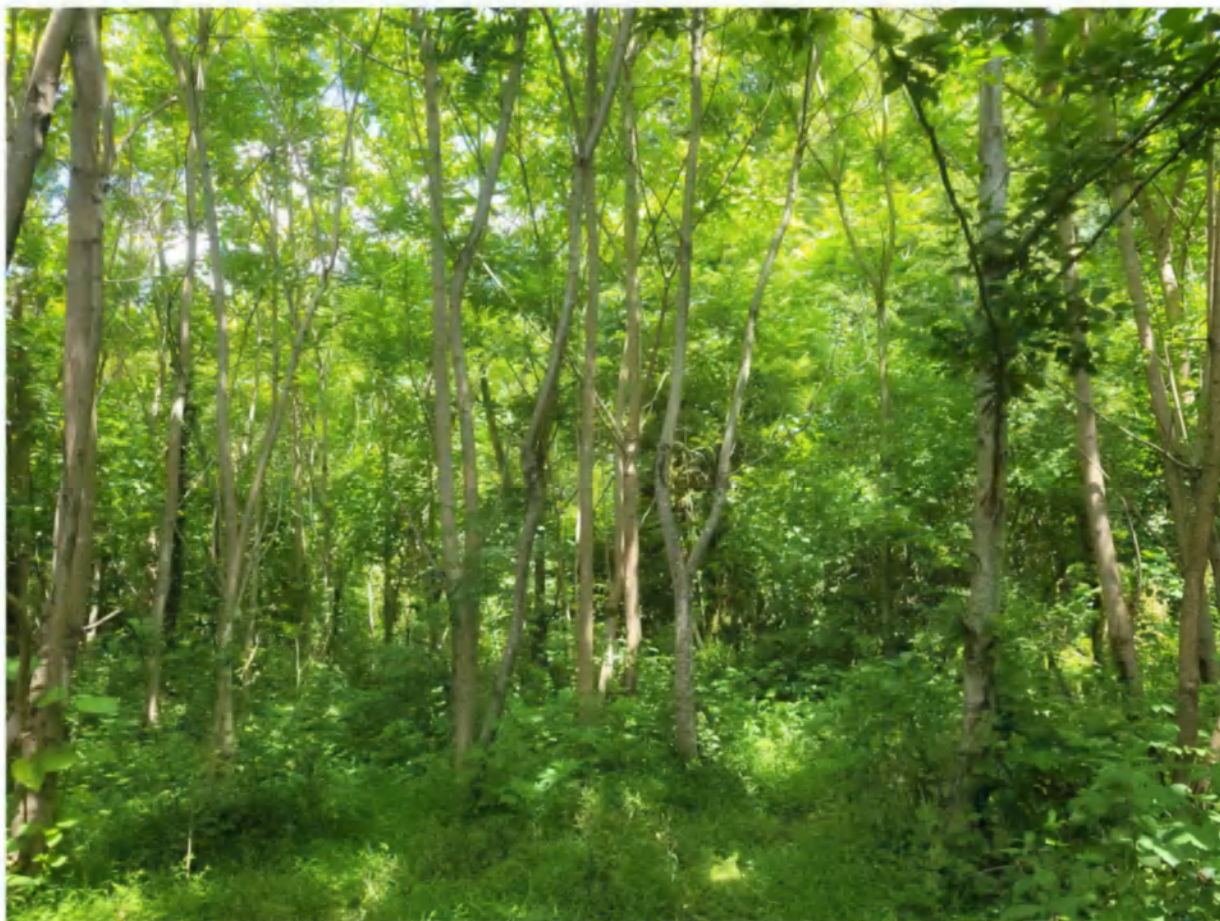


Рис. 1. Трансформированная лесная экосистема с доминированием *Paulownia tomentosa*.

Таблица 1. Видовой состав трансформированной и естественной экосистемы в пойме реки Мзымта

Тип экосистемы	Древесно-кустарниковая растительность	Травянистая растительность
Трансформированная экосистема	<b><i>Paulownia tomentosa</i> (Thunb.) Steud.</b> , <i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle, <i>Fraxinus excelsior</i> L.	<i>Circaea lutetiana</i> L., <b><i>Paspalum dilatatum</i> Poir.</b> , <i>Abutilon theophrasti</i> Medik., <i>Phytolacca americana</i> L., <i>Rumex confertus</i> Wild., <i>Urtica dioica</i> L., <i>Asarum intermedium</i> (C.A. Mey.) Grossh., <i>Impatiens noli-tangere</i> L., <i>Bidens frondosa</i> L., <i>Veronica arvensis</i> L., <i>Sambucus ebulus</i> L., <i>Rubus sanctus</i> Schreb., <i>Calystegia silvatica</i> (Kit.) Griseb., <i>Smilax excelsa</i> L.
Естественная экосистема	<i>Carpinus betulus</i> L., <i>Fagus orientalis</i> Lipsky, <b><i>Buxus colchica</i> Pojark. (усохший)</b> , <i>Sambucus nigra</i> L., <i>Corylus avellana</i> L., <i>Acer cappadocicum</i> Gled., <i>Acer campestre</i> L., <i>Ficus carica</i> L., <i>Fraxinus excelsior</i> L., <i>Hedera colchica</i> (K. Koch) K. Koch	<i>Symphytum grandiflorum</i> DC., <b><i>Oplismenus undulatifolius</i> (Ard.) P. Beauv.</b> , <b><i>Impatiens noli-tangere</i> L.</b> , <i>Mercarialis annua</i> L., <i>Solanum nigrum</i> L., <i>Salvia glutinosa</i> L., <i>Phytolacca americana</i> L., <i>Allium ursinum</i> L., <i>Symphytum grandiflorum</i> DC., <i>Carex flacca</i> Schreb., <i>Phyllitis scolopendrium</i> (L.) Newman, <i>Urtica dioica</i> L., <i>Rubus caesius</i> L., <i>Sagina apetala</i> Ard, <i>Juncus effusus</i> L., <i>Asarum intermedium</i> (C.A. Mey.) Grossh., <i>Cyclamen coum</i> Mill., <i>Oxalis acetosella</i> L., <i>Paris incompleta</i> M. Bieb., <i>Polystichum aculeatum</i> L., <i>Geranium robertianum</i> L., <i>Galanthus woronowii</i> Losinsk., <i>Helleborus caucasicus</i> A. Braun, <i>Ruscus aculeatus</i> L., <i>Mycelis muralis</i> (L.) Dumort., <i>Carpesium abrotanoides</i> L., <b><i>Erigeron annuus</i> (L.) Desf.</b> , <i>Arctium lappa</i> L., <i>Lycopus europaeus</i> L., <i>Solanum persicum</i> Willd. ex Roem. & Schult., <i>Trifolium campestre</i> Schreb., <i>Polystichum braunii</i> (Spenn.) Fee, <i>Alkekengi officinarum</i> Moench, <i>Ranunculus cappadocicus</i> Willd.

Примечание - Жирным шрифтом отмечены доминанты и содоминанты каждого яруса, подчёркиванием – чужеродные виды

В естественно-нарушенных экосистемах региона (горные реки, вывалы леса) к видам-трансформерам в полной мере можно отнести лишь незначительное число древесно-кустарниковых видов (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud, *Catalpa ovata* D. Don., *Buddleja davidii* Franch). Тем не менее их влияние на видовой состав естественно-нарушенных экосистем существенен. Под их пологом зачастую появляются сопутствующие травянистые чужеродные виды: *Duchesnea indica* (Andrews) Focke, *Phytolacca americana* L. *Ambrosia artemisiifolia* L., *Bidens frondosa* L., *Paspalum dilatatum* Poir., *Oxalis corniculata* L., *Phalacrolooma annuum* (L.)

Dumort, *Conyza canadensis* (L.) Cronqist, *Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus., *Microstegium japonicum* (Miq.) Koidz., *Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino и т.д.

На отдельных участках Шахе, второй по длине реки Сочинского национального парка, активно конкурируют за жизненное пространство древесно-кустарниковые виды-трансформеры *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud и *Catalpa ovata* D. Don и остаётся неясным, какие факторы среды играют ключевую роль в пространственном распределении экземпляров этих видов.

Для идентификации наиболее значимых факторов, обуславливающих пространственное распределение экземпляров обоих видов, проводили моделирование методом максимальной энтропии с использованием MaxEnt (Version 3.4.4). Расчеты по каждому из видов производили в 10 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.

При моделировании пространственного распределения экземпляров видов 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/м<sup>2</sup>/день), скорость ветра (м/с), среднемесячная влажность воздуха (давление водяного пара, кПа);

- Биоклиматические переменные Worldclim.

- Экологические переменные ENVIREM (Title, 2018).

Растровые слои, характеризующие естественную и антропогенную нарушенность ландшафтов (населённые пункты, дороги, реки) получали с помощью инструмента Евклидово расстояние (Euclidean distance) в среде ArcGIS.

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

Первоначальное количество предикторных переменных, представленных в растровом формате, составило 153. Расчет коэффициентов линейной корреляции (корреляции Пирсона) между растровыми изображениями проводили в R. Растровые изображения с коэффициентами корреляции между значениями, превышающими 0.75 считали скоррелированными и исключали при дальнейшем анализе. После исключения скоррелированных переменных, количество растровых изображений составило 49.

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

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 ( $\Delta AICc$ ).

При дискретной классификации данных растровых изображений использовали пороговое значение 10TP (10 percentile training omission threshold).

Результаты моделирования пространственного распределения свидетельствуют о том, что во многом оба вида приурочены к местам произрастания, обладающим схожими биоклиматическими и физико-географическими условиями. При этом большая часть антропогенно- и естественно нарушенных экосистем изучаемого региона практически в равной степени уязвима к внедрению обоих древесных чужеродных видов (рис. 2).



Рис. 2. Карта пригодности мест произрастания *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* на юге Российского Причерноморья, построенная с помощью моделирования методом максимальной энтропии.

Из всех переменных среды, годовая сумма осадков и солнечная радиация внесли наибольший вклад в результаты моделирования пространственного распределения как *Paulownia tomentosa*, так и *Catalpa ovata* (табл. 2).

Таблица 2. Вклад переменных среды в формирование области распространения *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata*

Переменная	Вклад в построение модели, %	
	<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Catalpa ovata</i>
Годовая сумма осадков	58.5	69
Солнечная радиация	14.5	17.9

На рисунке 3 представлено распределение экземпляров видов *Paulownia tomentosa* и *Catalpa ovata* в двухфакторном экологическом пространстве наиболее значимых факторов.

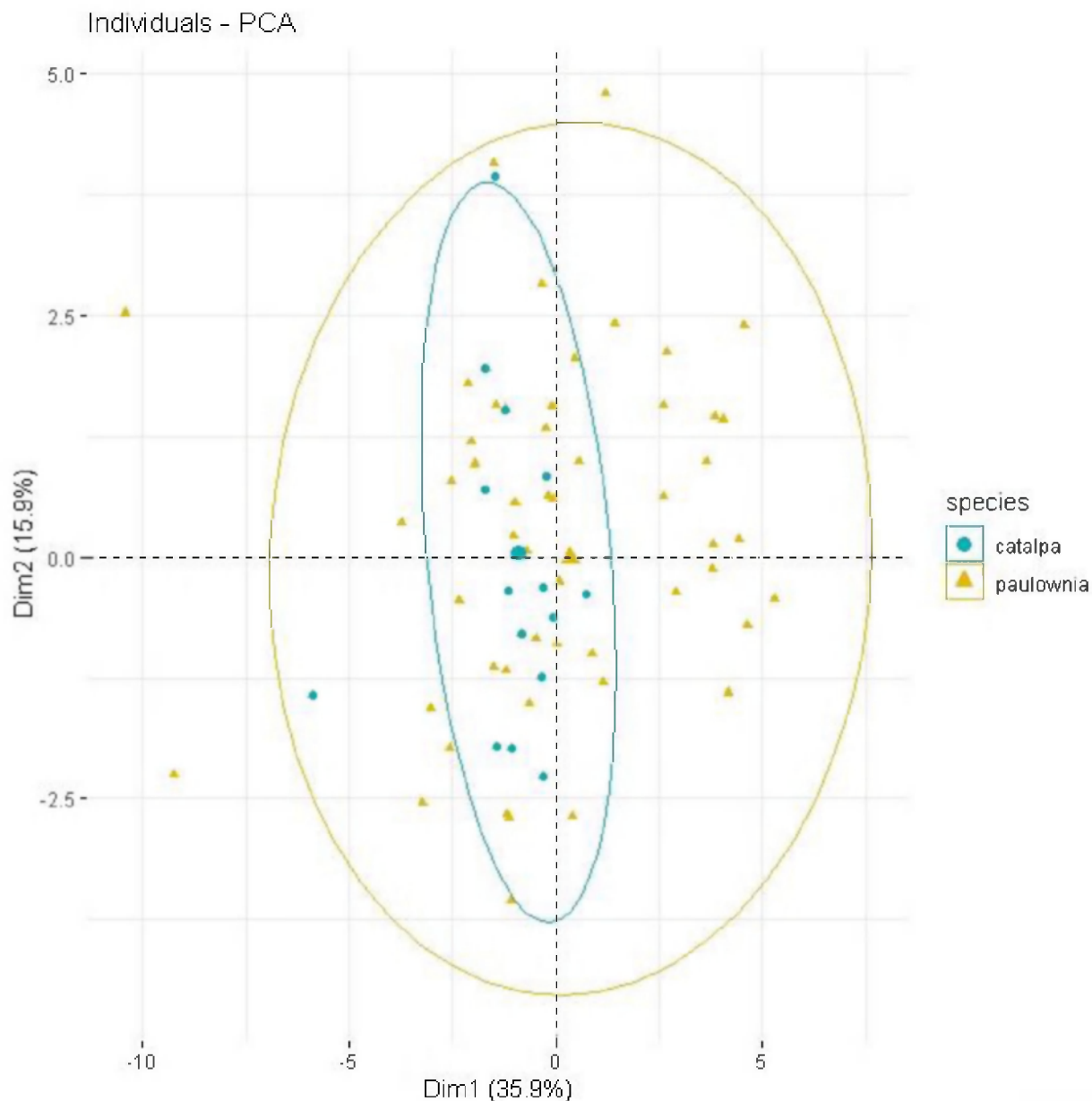


Рис. 3. Распределение точек наблюдений видов *Catalpa ovata* и *Paulownia tomentosa* в экологическом пространстве двух факторов исследуемого региона, объясняющих 51,8% суммарной дисперсии.

Таким образом, *Catalpa ovata* более чувствительна к изменению годовой суммы осадков, а также солнечной радиации нежели *Paulownia tomentosa*.

Остаётся открытым вопрос, как климатические изменения повлияют на дальнейшее распространение наиболее агрессивных чужеродных видов в регионе.

Анализ биоклиматических растровых изображений прогнозной климатической модели (CCSM4) свидетельствует о том, что наиболее заметные климатические изменения будут наблюдаться в среднегорных и высокогорных районах изучаемого региона. Наиболее значимое изменение среднегодовой температуры следует ожидать к 2050 году, далее рост среднегодовой температуры замедлится.

В населённых пунктах региона исследований повышение среднегодовой температуры к 2050 году в зависимости от сценария может составить от 1.5 до 2.6°C, а к 2070 году от 1.6 до 3.6°C. При этом рост максимальной температуры самого тёплого месяца года к 2050 году составит от 2.3°C (репрезентативная траектория концентраций: RCP2.6) до 3.6°C (RCP8.5), а к 2070 году 2°C и 5°C соответственно. Минимальные температуры самого холодного месяца года увеличатся во всех населённых пунктах региона. Климатические изменения в целом будут сопровождаться незначительным увеличением годовой суммы осадков к 2050 году (за исключением самого экстремального

сценария) с последующим снижением к 2070 году. Увеличение количества осадков будет отмечаться в самый влажный месяц года и преимущественно уменьшаться в самый сухой месяц года. Изменения годовой суммы осадков составят от +30мм (RCP2.6) до -42мм (RCP8.5) к 2050 году и от -8мм (RCP2.6) до -36мм (RCP8.5) к 2070 году. Такие климатические изменения не могут не повлиять на видовой состав и распространение чужеродных видов региона в будущем.

Результаты моделирования пространственного распределения с использованием MaxEnt свидетельствуют о том, что климатические условия 2050 и 2070 годов будут благоприятствовать дальнейшему распространению ряда видов: *Ambrosia artemisiifolia* L., *Amorpha fruticosa* L., *Andropogon virginicus* L., *Abutilon theophrasti* Medikus, *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist, *Cyclachaena xanthiifolia* (Nutt.) Fresen, *Duchesnea indica* (Andrews) Focke, *Elaeagnus pungens* Thunb., *Euphorbia maculata* L., *Euphorbia nutans* Lag., *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, *Microstegium japonicum* (Miq.) Koidz., *Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus, *Miscanthus sinensis* Andersson, *Oenothera biennis* L., *Oenothera erythrosepala* Borbas, *Oenothera oakesiana* (Gray) J.W. Robbins ex S. Wats. & Coult., *Oxalis corniculata* L., *Phytolacca americana* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H. Wendl. Тем не менее прогнозируемые климатические изменения приведут к сокращению территории комфортной для произрастания многих чужеродных видов, широко распространённых в настоящее время на территории изучаемого района. К таким видам можно отнести: *Amaranthus blitum* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Bidens bipinnata* L., *Bidens frondosa* L., *Buddleja davidii* Franch, *Catalpa ovata* D. Don., *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *Galinsoga ciliata* (Raf.) Blake, *Galinsoga parviflora* Cav., *Gleditsia triacanthos* L., *Helminthotheca echioides* (L.) Holub, *Hemerocallis fulva* L., *Muhlenbergia schreberi* J.F. Gmel., *Oxalis stricta* L., *Paspalum dilatatum* Poir., *Robinia pseudoacacia* L., *Rosa multiflora* Thunb., *Solidago canadensis* L., *Sorghum halepense* (L.) Pers. При этом самый экстремальный сценарий климатических изменений (RCP8.5) будет негативно влиять на распространение всех чужеродных видов, широко представленных ныне на изучаемой территории.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что климатические изменения в сильной степени повлияют на современный пул чужеродных видов растений. Изменяющиеся климатические условия будут приводить к исчезновению целого ряда ныне широко распространённых пришлых видов. По-видимому, этот процесс будет сопровождаться появлением новых чужеродных видов растений, более приспособленных к изменившимся условиям среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Туниев Б.С., 2023. Эксклюзивная роль Сочинского национального парка в сохранении биоразнообразия природной флоры и фауны России // Сочинскому национальному парку - 40 лет. Труды Сочинского национального парка. Вып. 14. Сочи: Типография «Оптима» (ИП Кривлякин С. П.). С 13-43.

Тимухин И.Н., 2023. Дополнения к флоре сосудистых растений Сочинского национального парка за период исследований 2018 - 2022 годов // Сочинскому национальному парку - 40 лет. Труды Сочинского национального парка. Вып. 14. Сочи: Типография «Оптима» (ИП Кривлякин С. П.). С 149-166.

Muscarella R., Galante P.J., Soley-Guardia M., Boria R.A., Kass J.M., Uriarte M., Anderson R.P., 2018. Package 'ENMeval', version 0.3.0. Automated Runs and Evaluations of Ecological Niche Models. 26 p.

Title P.O., Bemmels J.B., 2018. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling // Ecography. № 41. P. 291-307.

Tuniyev B.S., Timukhin I.N., 2017. Species composition and comparative-historical aspects of expansion of alien species of vascular plants on the Sochi Black Sea Coast (Russia) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. № 2 (4). P. 2-25.