

УДК 581.9:551.583(470.620)

## Прогнозирование влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродного компонента флоры юга черноморского побережья Краснодарского края

*Егошин А. В.*

*Сочинский национальный парк  
Сочи, Россия  
avegoshin@gmail.com*

Инвазии чужеродных видов представляют одну из серьёзных угроз для биоразнообразия нашей планеты, которая в условиях ускоряющейся глобализации и климатических изменений становится всё более острой. Побережье юга Краснодарского края в силу своих биоклиматических условий и высокого уровня антропогенной нагрузки является вторичным ареалом для большого количества чужеродных видов. Согласно результатам пространственного моделирования, в настоящее время климатические условия наиболее удовлетворяют биологическим требованиям только 74 из 182 чужеродных видов широко представленных в регионе исследований. В статье приведены результаты пространственного моделирования всех наиболее опасных чужеродных видов региона с использованием программы MaxEnt и предикторных биоклиматических переменных Worldclim, дан прогноз их распространения в 2050 и 2070 годах с использованием климатической модели CCSM4 для четырёх репрезентативных траекторий концентраций (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). Результаты моделирования показали, что климатические изменения будут способствовать дальнейшему распространению далеко не всех чужеродных видов, ныне широко представленных в регионе. Прогнозируемые климатические изменения приведут к сокращению территории комфортной для произрастания некоторых пришлых видов. При этом условия самого экстремального сценария климатических изменений (RCP8.5) будут тормозить распространение всех представителей современного пула чужеродных видов региона. Высказано предположение, что в будущем следует ожидать обновление регионального пула пришлых видов.

*Ключевые слова:* инвазии, чужеродные виды растений, Кавказ, Краснодарский край, Сочи, моделирование, GIS, Maxent.

### ВВЕДЕНИЕ

Юг Черноморского побережья Краснодарского края характеризуется высоким уровнем геоморфологического и климатического разнообразия, что способствовало формированию здесь богатого уникального видового и экосистемного разнообразия в прошлом и способствует натурализации большого числа экзотических видов в настоящее время.

В последнее время побережье Краснодарского является одним из самых популярных направлений туристского отдыха и внутренней миграции в стране, что неизбежно ведёт к росту антропогенной нагрузки, ускоряя процессы трансформации экосистем. В итоге это приводит к тому, что регион становится всё более уязвимым в отношении дальнейшей натурализации, как преднамеренно, так и непреднамеренно интродуцированных чужеродных видов. Ожидается, что климатические изменения будут способствовать дальнейшему увеличению ареала некоторых видов живых организмов, в том числе и чужеродных (Climate Change..., 2014). Поэтому изучение влияния климатических изменений на пространственное распределение чужеродных видов имеет важное значение для сохранения уникального биоразнообразия региона. На пространственное распределение чужеродных видов оказывает влияние множество различных экологических факторов, как биотических, так и абиотических, которые сложно оценить в комплексе. Тем не менее в последнее десятилетие появилось в открытом доступе большое количество пространственных данных содержащих различную информацию об окружающей среде (Vega et al., 2018) равно, как и пространственных данных о местах присутствия экземпляров различных видов живых организмов (GBIF, EDDMapS), что даёт возможность моделировать процессы

распространения чужеродных видов на новой родине, в том числе и с учётом климатических изменений (Schwartz et al., 2006; Rodríguez et al., 2007; Peterson, 2011).

Цель настоящей работы – провести моделирование пространственного распределения наиболее агрессивных чужеродных видов на юге Черноморского побережья Краснодарского края, а также спрогнозировать их дальнейшее распространение.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Регионом исследований является район Большого Сочи, располагающийся на юге Краснодарского края России и простирающийся от водораздела рр. Магри и Шепси – на северо-западе и до реки Псоу – на юго-востоке. Значительную часть территории (~83 %) изучаемого района занимают особо охраняемые природные территории Федерального значения (Сочинский национальный парк, Кавказский государственный природный биосферный заповедник).

По способности проникать в экосистемы юга Черноморского побережья Краснодарского края различной степени нарушенности все чужеродные виды региона исследований были подразделены на 6 классов (Егошин, 2018):

1) виды, которые встречаются в местах заноса не более двух вегетационных сезонов, а затем исчезают без должного агротехнического ухода

2) виды, произрастающие в местах заноса, но не размножающиеся без участия человека (растения парков)

3) виды, произрастающие в местах заноса продолжительное время, размножающиеся, но не покидающие место заноса

4) виды, распространяющиеся в антропогенно нарушенных экосистемах (дороги, ЛЭП и т. д.)

5) виды, способны внедряться не только в антропогенно-нарушенные, но и в естественно нарушенные экосистемы (прибрежные местообитания, вывалы деревьев)

6) виды, обладающие способностью натурализоваться в естественных экосистемах, не имеющих следов естественных и антропогенных нарушений.

Объектом исследований были виды, представляющие наибольшую угрозу для биоразнообразия экосистем региона (классы 3–6).

В ходе проведения полевых исследований с 2015 по 2019 год фиксировали географические координаты мест произрастания чужеродных видов растений. Собранный массив данных было дополнен информацией, представленной в базах данных по биоразнообразию ([www.gbif.org](http://www.gbif.org), [www.eddmmaps.org](http://www.eddmmaps.org)). Впоследствии данные о распространении чужеродных видов были пространственно «прорежены» с использованием инструмента SDMtoolbox в среде ArcGIS (дистанция прореживания составила 1 км). В итоге общее количество мест произрастания чужеродных видов составило 420642. Минимальное количество данных о местах произрастания имел вид *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud (375 точек), максимальное – *Conyza canadensis* (L.) Cronquist (20913 точек). Моделирование пространственного распределения видов проводили в среде MaxEnt (v. 3.3.3k) методом максимальной энтропии (Phillips et al., 2006; West et al., 2016). Расчёт проводили в 15 проворностях, выполняя 10 тысяч итераций по каждому пикселю, используемых в ходе анализа растровых изображений. Для каждого изучаемого вида 25 % точек находок использовали в качестве тестовой выборки, 75 % – в качестве обучающей (Zhang et al., 2018).

При этом в качестве источника предикторных переменных использовали биоклиматические растровые изображения Worldclim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)), как усреднённые за временной период с 1970 по 2000, так и прогнозные на 2050 и 2070 годы, рассчитанные с использованием климатической модели CCSM4 для четырёх репрезентативных траекторий концентраций (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5), характеризующих величину антропогенно обусловленного радиационного воздействия, достигаемого к 2100 году по сравнению с 1750 годом (2,6; 4,5; 6,0 и 8,5 Вт/м<sup>2</sup>). Эти растры содержат информацию о различных климатических параметрах: BIO1 – Средняя годовая температура, BIO2 – Средняя суточная амплитуда температуры, BIO3 – Изотермичность (BIO1/BIO7) \* 100, BIO4 – Стандартное отклонение температур, BIO5 – Максимальная температура самого тёплого 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 тёплой четверти года, BIO19 – Сумма осадков в самой холодной четверти года. Результаты пространственного моделирования были представлены в виде растровых картографических изображений, каждая ячейка которых (в нашем случае площадь ячейки составляла 1 км<sup>2</sup>) содержит вероятностную оценку пригодности биоклиматических условий местности требованиям анализируемых видов. Затем проводили дискретную классификацию полученных растровых изображений. Для этого в качестве порогового значения использовали 10-ый процентиль. Значения ниже 10 процентиля считали, как неудовлетворяющие экологическим требованиям анализируемых видов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее число агрессивных и потенциально опасных чужеродных видов в изучаемом регионе составляет 182 (Солодыко, 2002; Зернов, 2013; Тимухин и др., 2015; Tuniyev и др., 2017), но согласно результатам пространственного моделирования, биоклиматические условия изучаемого района наиболее комфортны только для 74 видов и в будущем, в результате климатических изменений ситуация может кардинальным образом измениться (Егошин, 2020).

Анализ растровых изображениям Worldclim показывает, что заметные климатические изменения будут преимущественно наблюдаться в среднегорных и высокогорных районах Большого Сочи. Наиболее высокую скорость роста среднегодовой температуры следует ожидать к 2050 году (рис. 1).

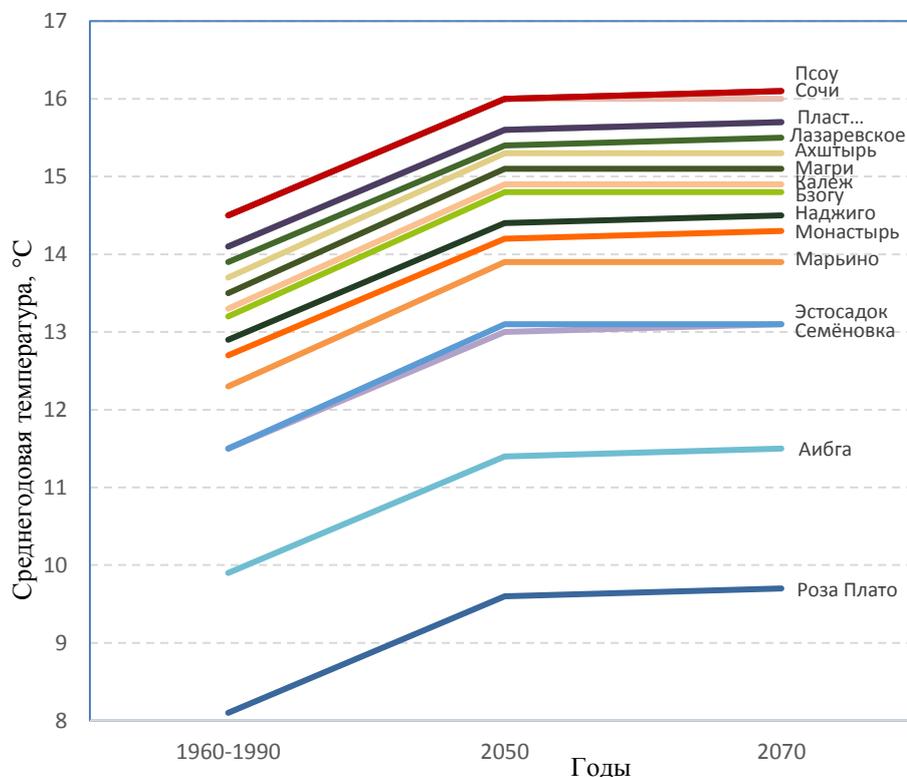


Рис. 1. Среднегодовая температура в основных населённых пунктах Большого Сочи

Повышение среднегодовой температуры в населённых пунктах изучаемого региона к 2050 году в зависимости от сценария будет варьировать от 1,5 до 2,6 °С, а к 2070 году от 1,6 до 3,6 °С. При этом рост максимальной температуры самого тёплого месяца года к 2050 году составит от 2,3 °С (репрезентативная траектория концентраций: RCP2.6) до 3,6 °С (репрезентативная траектория концентраций: RCP8.5), а к 2070 году – 2°С и 5°С соответственно. 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 в регионе.

В целом климатические условия 2050 и 2070 годов будут благоприятствовать дальнейшему распространению таких видов как *Ambrosia artemisiifolia* L., *A. fruticosa* L., *Andropogon virginicus* L., *Abutilon theophrasti* Medikus, *Conyza bonariensis* (L.) Cronqist, *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 erythrosepala* Borbas, *O. biennis* L., *O. oakesiana* (Gray) J.W. Robbins ex S. Wats. & Coult., *Phytolacca americana* L., *Oxalis corniculata* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. *Trachycarpus fortunei* (Hook.) H.Wendl (рис. 2 и 3).

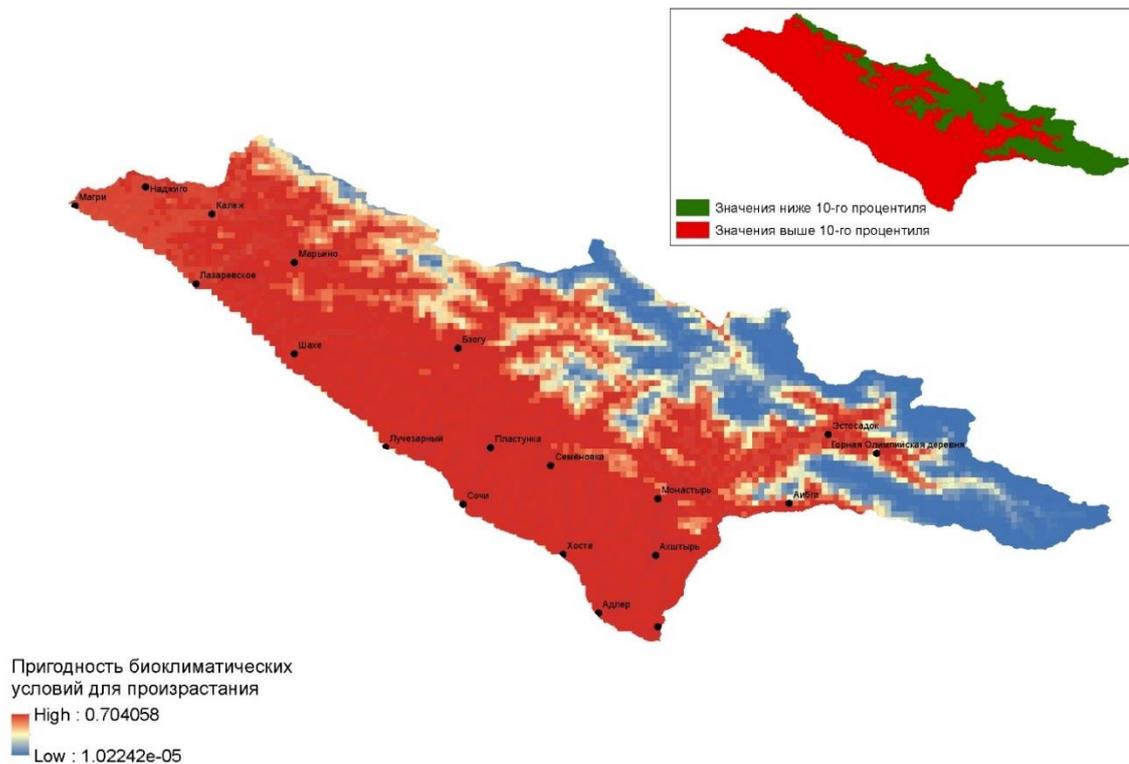


Рис. 2. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Duchesnea indica* (Andrews) Focke (AUC 0,934)

Как видно из рисунка, наибольший вклад в построение модели пространственного распределения вида вносят факторы: ВЮ11 – 25,2 % (коэффициент перемутации – 11,7 %), ВЮ17 – 19,8 % (коэффициент перемутации – 1,2 %), ВЮ1 – 17,7 % (коэффициент перемутации – 13 %). Красным цветом обозначены территории наиболее пригодные для произрастания вида, синим – малопригодные. Карта в правом верхнем углу – результат дискретной классификации растра с использованием 10-го перцентиля.

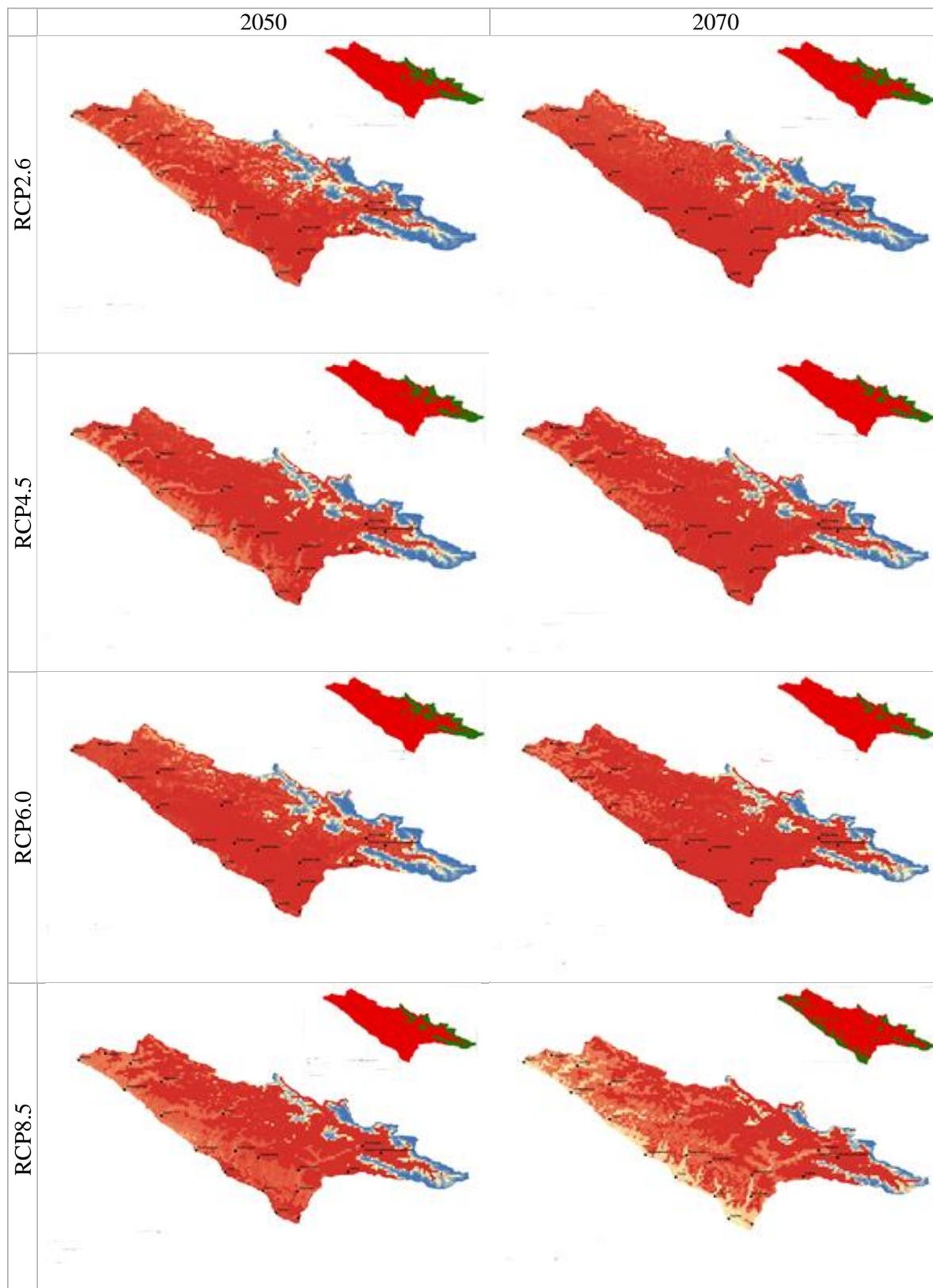


Рис. 3. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Duchesnea indica* (Andrews) Focke в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP)

RCP2.6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный.

Согласно результатам моделирования, прогнозируемые климатические изменения приведут к сокращению территории комфортной для произрастания многих чужеродных видов, 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. (рис. 4 и 5).

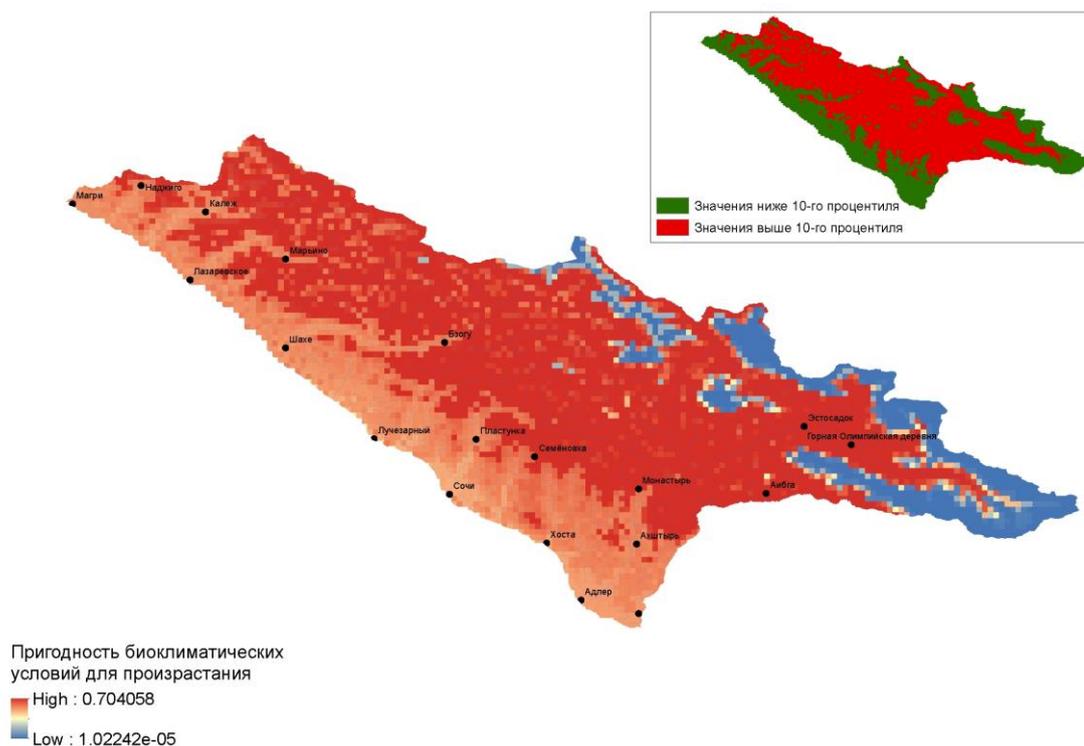


Рис. 4. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Hemerocallis fulva* L. (AUC 0,954)

Наибольший вклад в построение модели пространственного распределения вида вносят факторы: BIO14 – 31,2 % (коэффициент перемутации – 2,1 %), BIO1 – 25,1 % (коэффициент перемутации – 9,1 %). Красным цветом обозначены территории наиболее пригодные для произрастания вида, синим – малоприспособленные. Карта в правом верхнем углу – результат дискретной классификации раstra с использованием 10-го перцентиля.

При этом самый экстремальный сценарий климатических изменений (RCP8.5) будет негативно влиять на распространение всех чужеродных видов, широко представленных ныне на изучаемой территории.

Результат суммирования растровых изображений, характеризующих пригодность биоклиматических условий для произрастания изучаемых чужеродных видов растений представлен на рисунках 6 и 7.

Площади районов потенциальной инвазионной опасности, выделенные на основании пригодности территории для произрастания различного количества чужеродных видов растений, приведены в таблице 1.

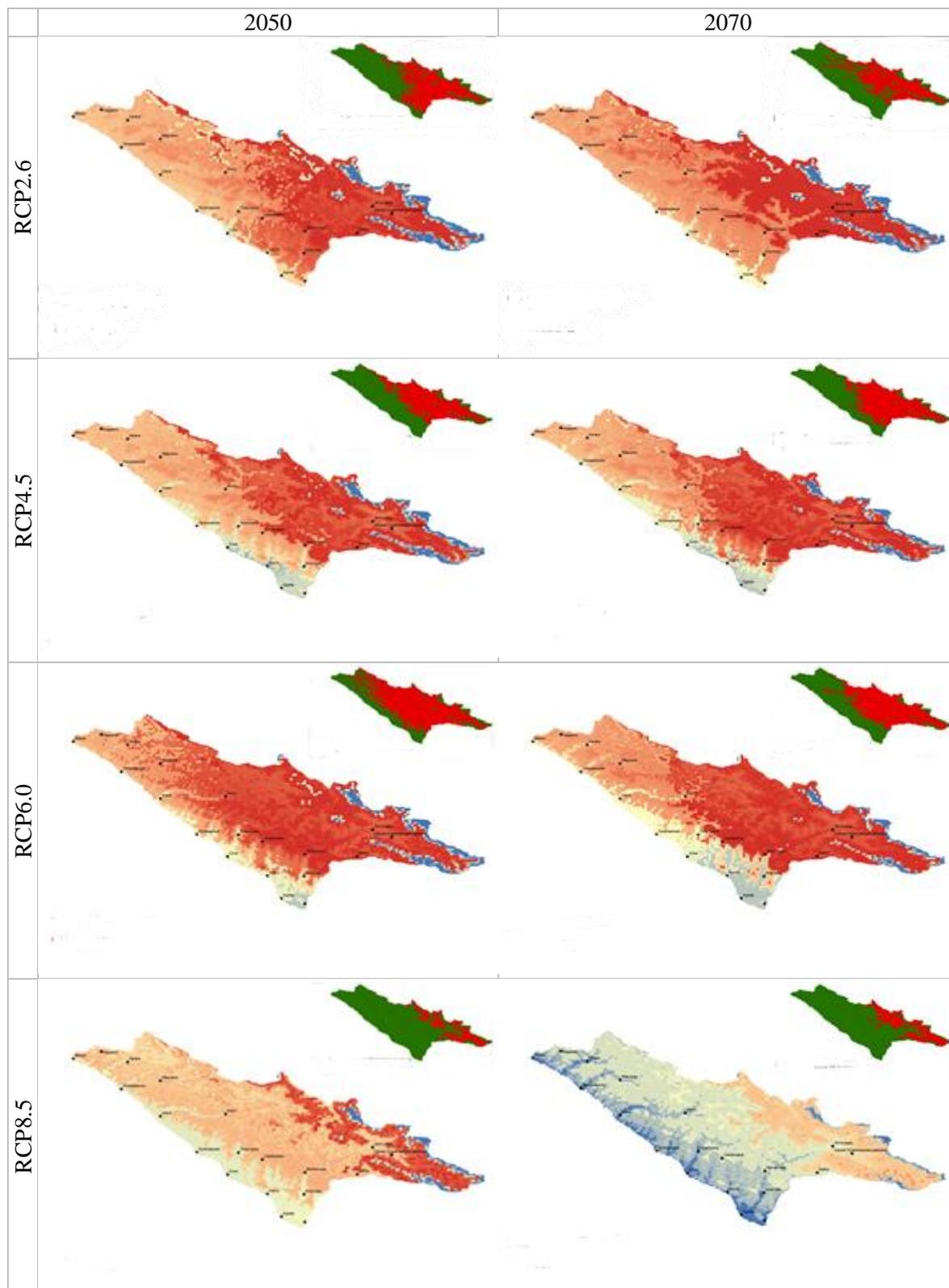


Рис. 5. Пригодность биоклиматических условий для произрастания *Hemerocallis fulva* L. в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP) RCP2.6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный.

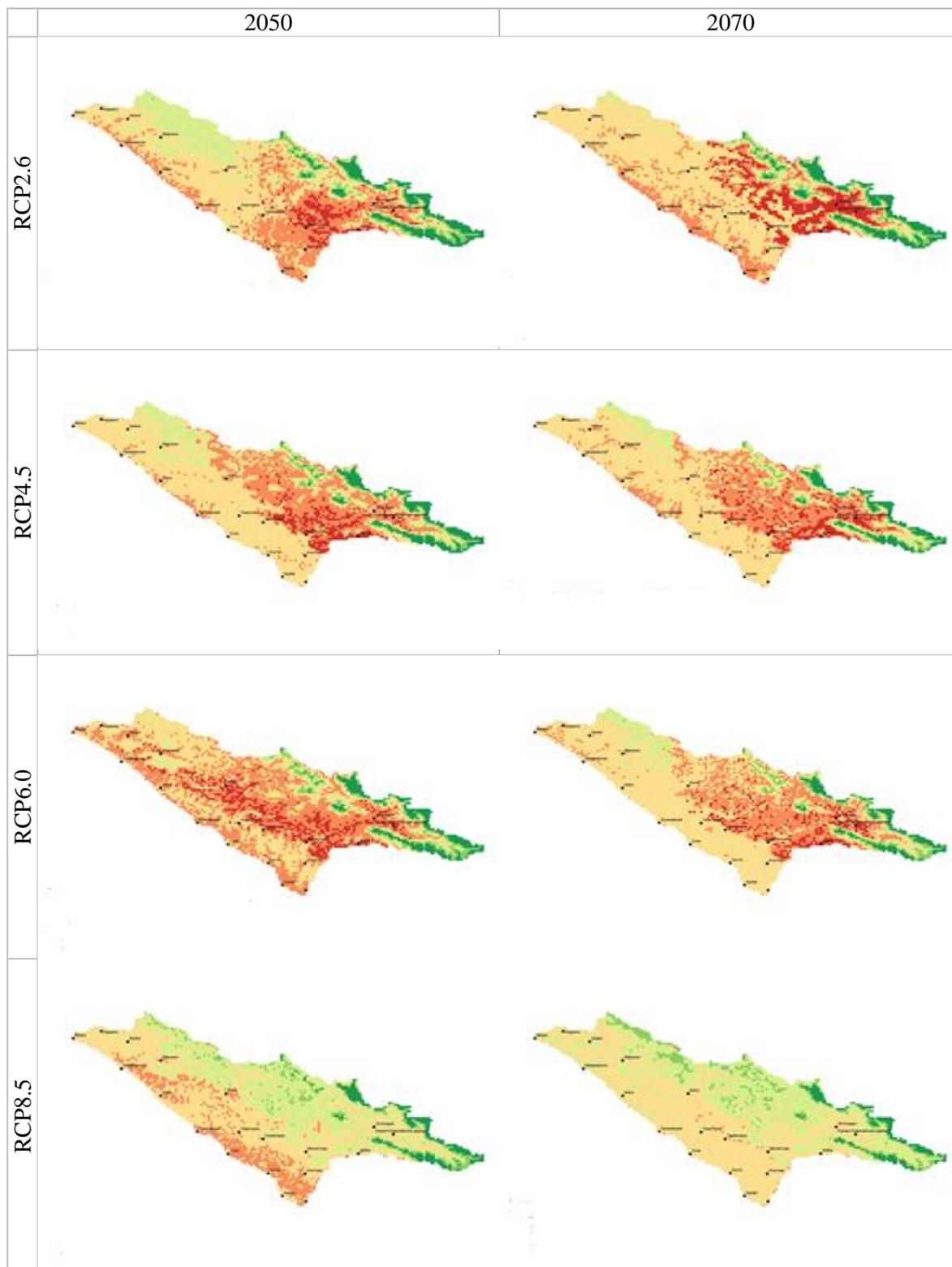


Рис. 6. Пригодность биоклиматических условий для произрастания наиболее агрессивных чужеродных видов в 2050 и 2070 году, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP) RCP2.6 – самый оптимистичный сценарий климатических изменений, RCP8.5 – самый пессимистичный

Число видов: ■ 0 - 10 ■ 11 - 20 ■ 21 - 30 ■ 31 - 40 ■ 41 - 45 ■ 46 - 60

Таблица 1

Площадь районов потенциальной инвазионной опасности Большого Сочи, рассчитанная для четырех репрезентативных траекторий концентраций (RCP), км<sup>2</sup>

| Район | 1960-1990 | RCP2.6 |        | RCP4.5 |        | RCP6.0 |        | RCP8.5 |        |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |           | 2050   | 2070   | 2050   | 2070   | 2050   | 2070   | 2050   | 2070   |
| 1     | 478,6     | 240,6  | 230,9  | 201,9  | 156,8  | 183,8  | 129,0  | 156,7  | 125,1  |
| 2     | 157,2     | 157,9  | 155,3  | 122,4  | 103,1  | 154,7  | 138,6  | 192,5  | 263,8  |
| 3     | 173,9     | 642,4  | 204,6  | 357,3  | 284,2  | 207,3  | 314,8  | 1110,0 | 1223,3 |
| 4     | 594,0     | 1345,8 | 1846,7 | 1705,5 | 1746,4 | 1218,7 | 1823,4 | 1541,6 | 1787,8 |
| 5     | 1629,5    | 892,6  | 618,8  | 826,3  | 905,0  | 1299,8 | 821,3  | 393,4  | 11,6   |
| 6     | 408,4     | 162,6  | 384,9  | 211,6  | 229,6  | 331,9  | 184,5  | -      | -      |

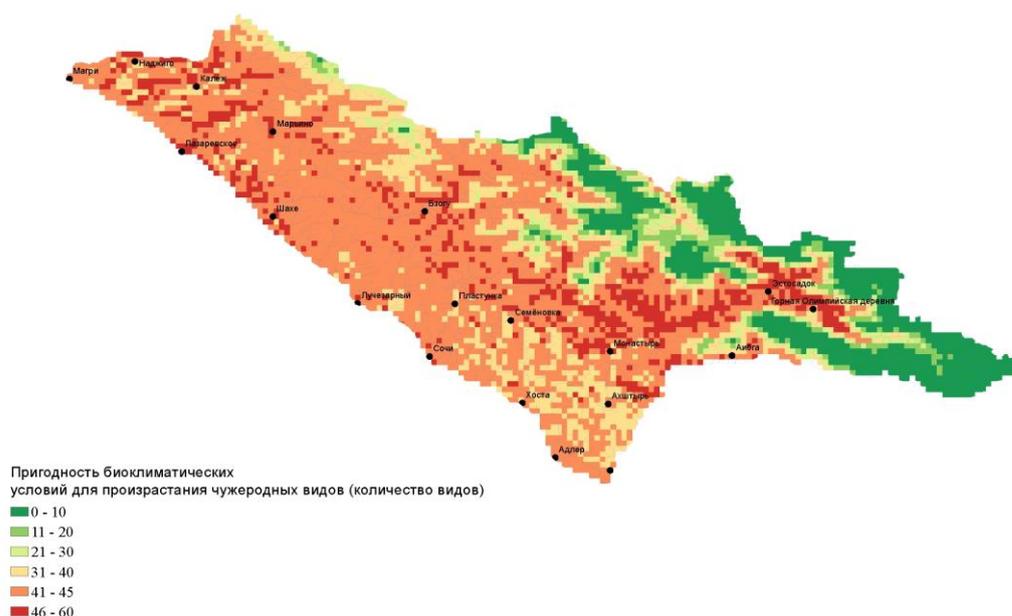


Рис. 7. Пригодность биоклиматических условий для произрастания наиболее агрессивных чужеродных видов. Территории пригодные для произрастания наибольшего количества чужеродных видов изображены красным цветом

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время климатические условия наиболее удовлетворяют биологическим требованиям 74 из 182 чужеродных видов, широко представленным в регионе исследований.

Результаты моделирования пространственного распределения видов-вселенцев свидетельствуют о том, что климатические изменения могут в сильной степени повлиять на современный региональный пул чужеродных видов растений. Изменяющиеся климатические условия перестанут удовлетворять биологическим требованиям некоторых агрессивных инородных видов. При этом климатические условия самого экстремального сценария климатических изменений (RCP8.5) будут тормозить распространение всех представителей современного пула чужеродных видов региона. По-видимому, дальнейший процесс климатических изменений будет сопровождаться появлением и распространением новых видов чужеродных растений на юге Черноморского побережья Краснодарского края.

## Список литературы

Егошин А.В. Адвентивный компонент флоры Юга Российского Причерноморья. Моделирование пространственного распределения адвентивных видов, на примере *Paulownia tomentosa* / Сочинскому национальному парку – 35 лет // Труды Сочинского национального парка. – Выпуск 12. – Сочи: Типография «Оптима», 2018. – С. 140 – 153.

Егошин А. В. Видовой состав, структура и пространственное распределение чужеродного компонента флоры Юга Российского Причерноморья // Живые и биокосные системы. – 2020. – № 32. – Режим доступа: URL: <https://jbks.ru/archive/issue-32/article-3>

Зернов А. С. Иллюстрированная флора юга Российского Причерноморья. – М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2013. – 588 с.

Солодько А. С. Флора Сочинского Причерноморья. – Сочи. – 2002. – 65 с.

Тимухин И. Н., Туниев Б. С. Современная экспансия инвазивных видов флоры сосудистых растений в Сочинском Причерноморье // Изучение флоры Кавказа: тез. докл. Междунар. науч. конф. – Пятигорск, 2015. – С. 106–107.

Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Eds. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer]. IPCC. – Geneva, Switzerland. – 151 p.

Peterson A. T. Ecological niche conservatism: a time-structured review of evidence // Journal of Biogeography. – 2011. – N 38. – P. 817–827.

Rodríguez J. P., Brotons L., Bustamante J., Seoane J. The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation // Diversity and Distributions. – 2007. – N 13. – P. 243–251.

Schwartz M. W., Iverson L. R., Prasad A. M., Matthews S. N., O'Connor R. J. Predicting extinctions as a result of climate change // Ecology. – 2006. – N 87. – P. 1611–1615.

Tuniyev 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. Заповедная наука. – 2017. – N 2 (4). – P. 2–25.

Vega G. C., Pertierra L. R., Olalla-Tárraga M. Á. MERRAclim, a high-resolution global dataset of remotely sensed bioclimatic variables for ecological modelling // Scientific Data. – 2018. – N 4. – 170078 p.

Zhang K., Yao L., Meng J., Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two eony pecies under climate change // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 634. – P. 1326–1334.

**Egoshin A.V. The influence of climate change on the spatial distribution of flora alien component on the southern Black Sea coast of Krasnodar Krai // Ekosistemy. 2021. Iss. 26. P. 23–32.**

Invasion of alien species is one of the most serious threats to our planet's biodiversity, which is becoming more and more urgent in the context of accelerating globalization and climate change. The southern coast of Krasnodar Krai (agglomeration of Greater Sochi) is a secondary habitat for a large number of alien species due to its bioclimatic conditions and a high level of anthropogenic impact. According to the results of spatial modeling, climatic conditions meet the biological requirements of only 74 of the 182 alien species widely represented in the research area. The article focuses on the results of spatial modeling of all the most dangerous alien species in the region (made with the MaxEnt program and bioclimatic predictor variables Worldclim). Moreover, on the basis of CCSM4 climate model the study gives a forecast of alien species distribution in 2050 and 2070 for four representative concentration trajectories (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5). The results of simulation show that further spatial distribution of not all alien species that are now widely represented in the region will be affected by climate change. The predicted climatic changes will lead to a reduction in the area comfortable for growth of some alien species. Simultaneously, the climatic conditions of the most extreme scenario of climatic changes (RCP8.5) will slow down the spread of all representatives of the modern pool of alien species in the region. It was supposed that new, more thermophilic alien species would appear on the Black Sea coast of the Krasnodar Krai in the future.

*Key words:* invasion, alien species of plants, the Black Sea, the Caucasus, Sochi, modeling, GIS, Maxent, spatial modeling, species distribution modelling, SDM.

*Поступила в редакцию 03.02.21*

*Принята к печати 24.04.21*