

Научная статья

УДК 581.9

DOI: 10.32516/2303-9922.2023.47.2

Построение потенциальных ареалов *Athyrium distentifolium* и *Diplazium sibiricum* на территории Евразии на основе климатических данных

Андрей Дмитриевич Демин¹, Алена Сергеевна Третьякова², Денис Юрьевич Ефимов³

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, andru1229@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5759-6034>

² Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия, alyona.tretyakova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8735-4482>

³ Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук, Борок, Россия, dnsfmv@ibiw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9029-6962>

Аннотация. С помощью метода максимальной энтропии в программе MaxEnt было оценено вероятностное местонахождение *Athyrium distentifolium* и *Diplazium sibiricum* — представителей двух редких и экологически дифференцированных видов папоротников как модельных объектов. Данные о распространении исследуемых видов были выгружены из Глобальной базы данных по биологическому разнообразию (GBIF). В качестве источника информации о климатических переменных среды использована открытая база данных Worldclim. Были выявлены биоклиматические переменные, ограничивающие ареалы модельных видов. Для *Athyrium distentifolium* наиболее важными биоклиматическими переменными являются величина осадков сухого месяца (bio14) и значение среднегодовой температуры (bio01). Для *Diplazium sibiricum* — значение среднегодовой температуры (bio01) и величина годовых осадков (bio12). Кроме того, вычислены диапазоны значений биоклиматических переменных, ограничивающих распространение видов, при которых отмечается наибольшая вероятность обнаружения видов. Результаты прогноза географического распространения модельных видов на 2040—2060 гг. при умеренном климатическом сценарии показывают значительный сдвиг их ареалов на север.

Ключевые слова: климатические переменные, математическое моделирование, папоротники, прогноз, распространение.

Благодарности. Работа выполнена в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина и Институте биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН (государственное задание № 121051100099-5).

Для цитирования: Демин А. Д., Третьякова А. С., Ефимов Д. Ю. Построение потенциальных ареалов *Athyrium distentifolium* и *Diplazium sibiricum* на территории Евразии на основе климатических данных // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2023. № 3 (47). С. 20—33. URL: http://vestospu.ru/archive/2023/articles/2_47_2023.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2023.47.2.

Original article

Building potential ranges of *Athyrium distentifolium* and *Diplazium sibiricum* in Eurasia based on climate data

Andrey D. Demin¹, Alena S. Tretyakova², Denis Yu. Efimov³

^{1,2} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, andru1229@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5759-6034>

² Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, alyona.tretyakova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8735-4482>

© Демин А. Д., Третьякова А. С., Ефимов Д. Ю., 2023

³Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Russia, dnsfmv@ibiw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9029-6962>

Abstract. Using the maximum entropy method in the MaxEnt program, potential distribution of two rare and ecologically differentiated fern species *Athyrium distentifolium* and *Diplazium sibiricum* as model objects was evaluated. The distribution data for studied species were loaded from global biodiversity database (GBIF). The WorldClim open database was used as a source of information on climate variables. Climatic factors limiting the area of model species were identified. The most important limiting factor for both species is the mean annual temperature (variable bio01). The distribution of *Athyrium distentifolium* is influenced by the amount of precipitation of the driest month (variable bio14), and the distribution of *Diplazium sibiricum* is influenced by the annual precipitation (variable bio12). Moreover, the ranges of bioclimatic variables with the highest probability of species detection were calculated. Prediction results of the geographical distribution of model species for 2040—2060 under a moderate climate scenario shows significant shift of their ranges to the north.

Keywords: climatic variables, mathematical modeling, ferns, prediction, distribution.

Acknowledgments. The work was carried out at the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin and the Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences (state order No. 121051100099-5).

For citation: Demin A. D., Tretyakova A. S., Efimov D. Yu. Building potential ranges of *Athyrium distentifolium* and *Diplazium sibiricum* in Eurasia based on climate data. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2023, no. 3 (47), pp. 20—33. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2023.47.2>.

Введение

Экологическое моделирование ареалов видов становится активно развиваемым научным направлением. Оно находится на стыке биогеографии, экологии и геоинформатики. Основная суть экологического моделирования заключается в сопоставлении значений факторов среды в местах регистрации вида со значениями тех же факторов среды по всей изучаемой территории. Это дает возможность установить связь местонахождений видов в природе и факторов окружающей среды, а также прогнозировать участки изучаемой территории, пригодные для существования вида [22—23; 28; 34]. Наиболее предпочтительным способом является регистрация параметров среды в местах обнаружения вида, однако такие данные, как правило, отсутствуют или ограничены. Поэтому все большую популярность набирает практика использования климатических наборов данных, спроецированных на земную поверхность с высоким пространственным разрешением [35]. Возможность проведения подобных исследований макрорегионального и глобального охвата возникла благодаря развитию и доступности сетевых ресурсов о распространении видов растений (глобальные порталы о биоразнообразии, GBIF) и об окружающей среде (ENVIREM, Worldclim и др.).

Экологическое моделирование ареалов используется для решения множества вопросов. Изучение потенциально пригодных местообитаний для редких и исчезающих видов важно для установления новых местонахождений и для мониторинга состояния их популяций [1; 21; 32]. Особый интерес имеет прогнозирование ареала вида при моделируемых сценариях глобальных климатических и социально-экономических изменений. Появляется возможность оценить динамику распространения вида в будущем [29], что особенно актуально для сохранения уязвимых видов [38; 41].

Одним из актуальных вопросов является прогнозирование потенциального вторичного ареала для чужеродных растений по результатам изучения условий их произрастания в нативном ареале. Это позволяет выявить наиболее уязвимые территории для инвазии вида, предположить степень возможного расселения вида и оценить потенциальные риски для природных экосистем [26; 27; 33; 40; 43].

Анализ оптимальных значений характерных для вида природно-климатических факторов позволяет выявить отличительные черты его экологической ниши, что расширяет наши представления об экологии и географии изучаемых таксонов [24; 25; 27].

Цель данного исследования — климатическое моделирование пространственного распространения двух модельных видов папоротников *Athyrium distentifolium* Tausch ex Opiz и *Diplazium sibiricum* (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata. Эти виды имеют широкий ареал, в пределах которого в нескольких субъектах Российской Федерации внесены в региональные Красные книги.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны два вида папоротников.

Athyrium distentifolium Tausch ex Opiz — многолетний короткокорневищный травянистый папоротник, психрофит. Произрастает в высокогорьях и в верхней части горно-таежного пояса, на каменистых склонах и осыпях, в субальпийских лугах и редколесьях. Вид имеет дизъюнктивный ареал: встречается на востоке Северной Америки, в Центральной и Северной Европе, на Урале и в Южной Сибири [30; 31]. Внесен в Красную книгу Архангельской области [2] и Ненецкого автономного округа [11].

Diplazium sibiricum (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata — многолетний длиннокорневищный травянистый папоротник, мезофит. Встречается в таежной зоне, в сырых хвойных и смешанных лесах, на облесенных скалах. Ареал вида охватывает северные и восточные районы Европы, Сибирь и Дальний Восток [30; 31]. Вид внесен в Красную книгу 17 субъектов Российской Федерации [3—10; 12—20]. Внесение обоих видов в региональные Красные книги связано с их редкостью в соответствующих субъектах Российской Федерации: нахождением видов в регионе на границе ареала и ограничением площади местообитаний, подходящих для их произрастания.

Для выявления потенциального ареала модельных видов применялся метод компьютерного моделирования в программе MaxEnt 3.4.0 [39]. Программа позволяет на основе известных местонахождений изучаемых видов и климатических параметров окружающей среды определить вероятность их присутствия на остальной территории посредством нахождения оптимального распределения вероятностей (максимальная энтропия) совпадения параметров среды. С помощью программы можно оценить значения климатических факторов, ограничивающих распространение видов, а также построить прогнозный ареал вида в будущем.

Таким образом, в данной работе для каждого вида описываются 3 разных ареала: фактический ареал — совокупность точек присутствия вида на карте, потенциальный ареал — модель пригодности текущих условий местообитаний, прогнозный ареал — модель пригодности будущих условий местообитаний.

Данные о распространении исследуемых видов на всем известном ареале были выгружены из Глобальной базы данных по биологическому разнообразию (GBIF). Были взяты только данные с пометками: “human observation” — вид был замечен человеком в дикой природе; “including coordinates” — данные с координатами. Всего было учтено 17490 находок *Athyrium distentifolium* [36] и 1296 находок *Diplazium sibiricum* [37].

Необходимо избежать ошибки при моделировании из-за неслучайных скоплений точек на карте распространения видов, которые связаны с хорошо исследованными районами [23]. Например, для вида *Athyrium distentifolium* большая часть наблюдений сосредоточена в Альпийских и Скандинавских горах. В связи с этим для каждого вида была подготовлена таблица коррекции, куда внесены данные со степенью разреженности 1°. Такая градация была подобрана опытным путем с учетом минимального разрешения

климатических слоев, которое составляло около $0,1^\circ$. Прореживание данных проводилось в программе Excel: был создан вспомогательный столбец с округленными до 1° значениями, далее удалялись повторяющиеся значения вспомогательного столбца. После прореживания количество наблюдений для *Athyrium distentifolium* составило 373, для *Diplazium sibiricum* — 416.

В качестве источника информации о параметрах среды использована открытая база данных Worldclim, содержащая информацию о 19 биоклиматических переменных [42] с пространственным разрешением 5 угловых минут (это чуть меньше $0,1^\circ$ и в полосе умеренного климата соответствует ширине клетки 3—7 км). Были использованы данные, усредненные за временной интервал 1970—2000 гг. и прогнозируемые на «ближайшее будущее» — временной интервал 2040—2060 гг. Произведена оценка вклада каждой переменной (percent contribution) в прирост информации в модели. Между биоклиматическими переменными существует корреляция, способная исказить оценку вклада той или иной переменной в модель [4], в связи с чем в анализ были включены только 7 часто используемых биоклиматических переменных: bio01 — среднегодовая температура, bio02 — средняя дневная разница температур, bio05 — максимальная температура самого теплого месяца, bio06 — минимальная температура самого холодного месяца, bio07 — годовой размах температур, bio12 — среднегодовое количество осадков, bio14 — количество осадков самого сухого месяца.

Для построения прогнозного ареала использовалась модель ACCESS-SM2 из базы Worldclim (Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model). Также был выбран один из четырех сценариев глобальных социально-экономических изменений — сценарий ssp-245, который соответствует текущей динамике развития общества и экономики без сильных изменений в позитивную или негативную сторону (полное название модели изменения климата ACCESS-SM2 ssp-246). Важно подчеркнуть, что для прогнозного ареала использовалась модель условий настоящего времени, а затем была сделана проекция модели с учетом изменившихся условий будущего.

При работе с MaxEnt использовали следующие настройки: логистический выходной формат (по умолчанию), 25% точек использовали как тестовую выборку и 75% — как обучающую. Оставшиеся настройки по умолчанию. При оценке модели рассматривались три ее параметра: AUC_{train} (area under curve) — параметр, показывающий точность моделирования для данных обучающей выборки; AUC_{test} — параметр, показывающий точность моделирования для данных тестовой выборки; доля вклада переменных.

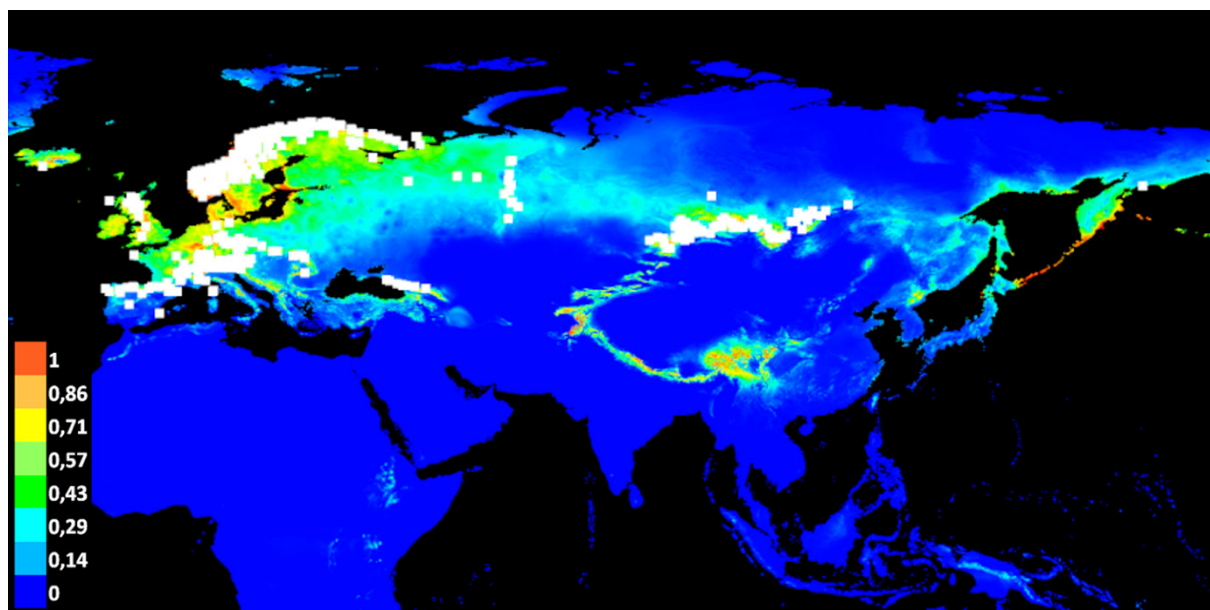
Результаты и обсуждение

Athyrium distentifolium встречается во всех горных районах Европы (Пиренеи, Альпы, Скандинавские горы), на Кавказе, Урале и Алтае. Наибольшее число местонахождений находится в Альпах и Скандинавии. Ареал данного вида в целом представлен изолированными местонахождениями (рис. 1А). Индекс качества прогнозной модели: AUC_{train} — 0,963, для тестовых данных AUC_{test} — 0,961.

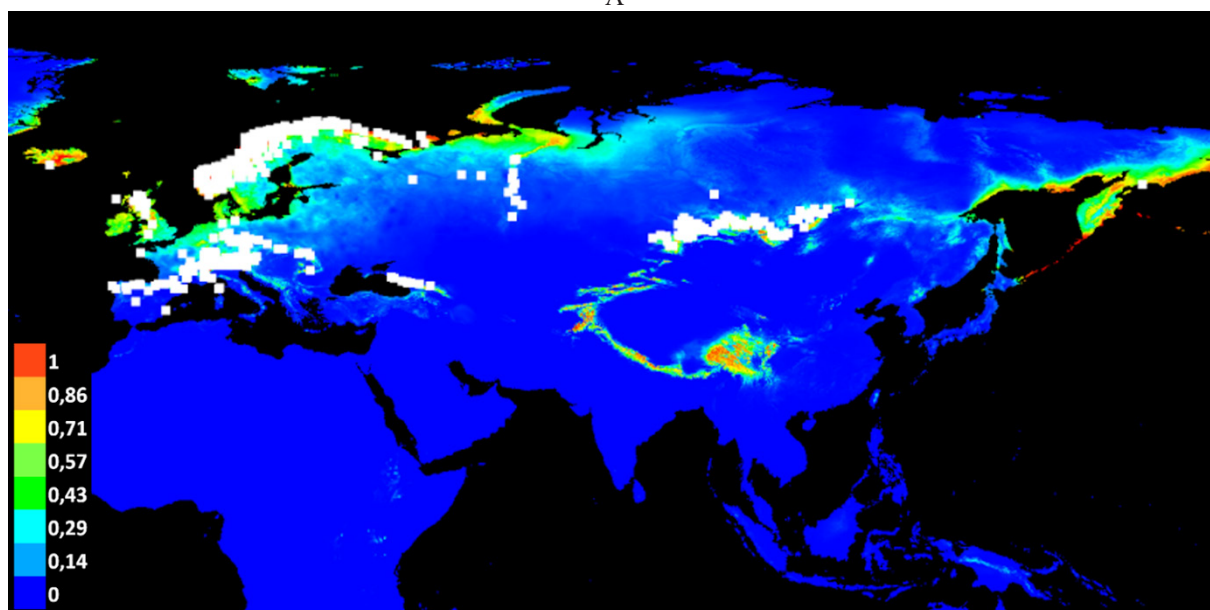
Ареал *Diplazium sibiricum* охватывает всю Евразию. Характерной особенностью его распространения является расположение в пределах бореальной зоны умеренного климатического пояса (рис. 2А). Безусловно, ареал данных видов отражает их экологическую амплитуду: кочедыжник расставленнолиственный — горнолесной вид, а диплазиум сибирский приурочен к лесным комплексам. Индекс качества прогнозной модели: AUC_{train} — 0,949, для тестовых данных AUC_{test} — 0,938.

На рисунках 1А и 2А представлены рассчитанные модели потенциальных ареалов с подходящими условиями для произрастания изученных видов по климатическим показателям. В обоих случаях эти территории шире, чем фактические ареалы видов. В качестве

потенциальных ареалов нами рассматриваются территории, где пригодность местообитаний, вычисленная программой, более 0,4 (на карте выделено зеленым цветом).



А



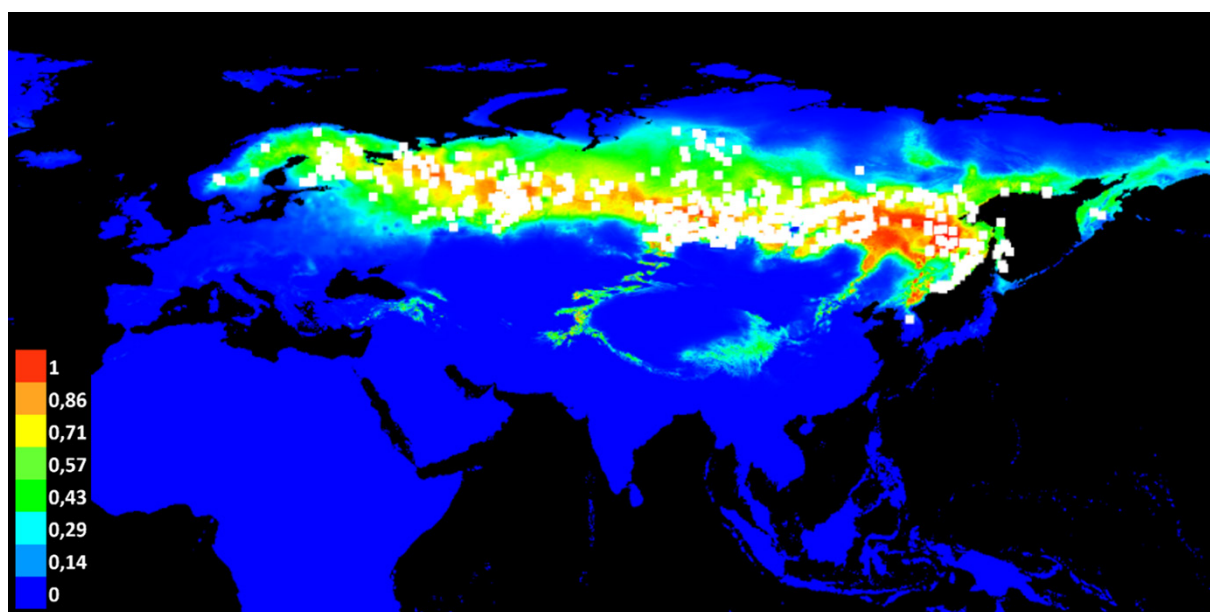
Б

Рис. 1. Евразийский фрагмент прогнозных карт распространения *Athyrium distentifolium* на основе биоклиматических переменных BIOCLIM: А) интерполяция данных с 1970 по 2000 г.; Б) интерполяция данных с 2040 по 2060 г. Цветная шкала показывает вероятность встречи вида в данных климатических условиях. Белыми точками показана современная встречаемость вида

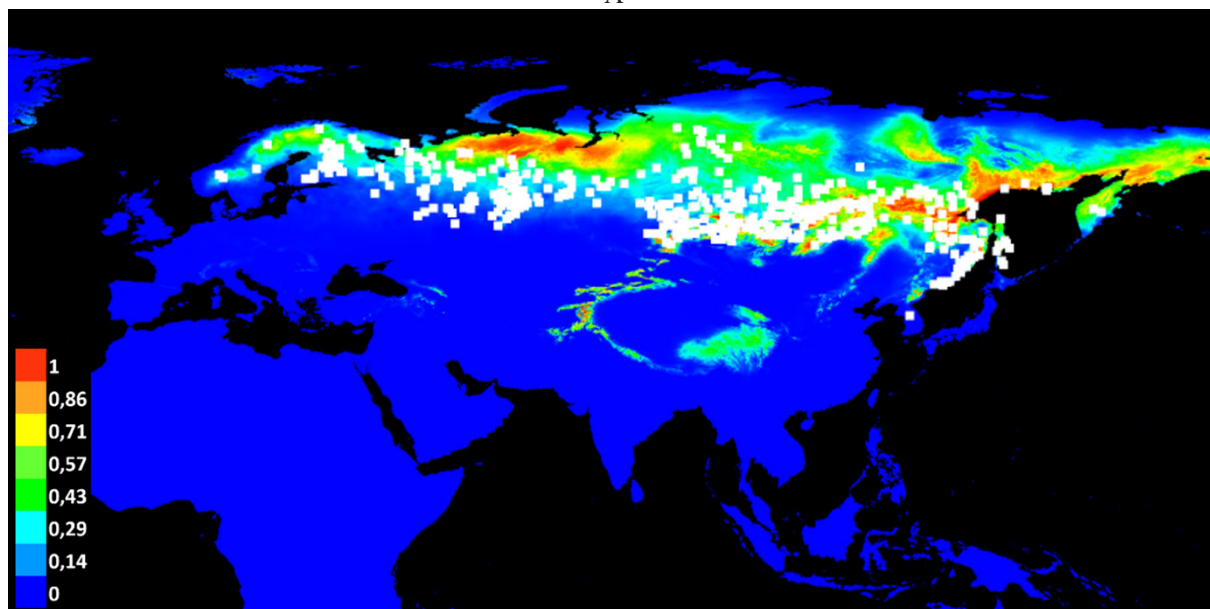
Fig. 1. Eurasian fragment of predictive distribution maps of *Athyrium distentifolium* based on BIOCLIM bioclimatic variables: A) data interpolation from 1970 to 2000; B) data interpolation from 2040 to 2060. The color scale shows the probability of meeting the species in given climatic conditions. White dots show the current occurrence of the species

Обнаружены территории с подходящими условиями для произрастания *Athyrium distentifolium* и *Diplazium sibiricum*, которые не входят в фактический ареал данных видов. К таким территориям для *Athyrium distentifolium* можно отнести Среднеевропейскую равнину, южную часть Финляндии, полуостров Камчатка, Тибет (рис. 1А). Для

Diplazium sibiricum — участки Верхоянского хребта и Корякского нагорья, бореальную зону Северной Америки (центральную часть Канады, южную часть Аляски), Тибет (рис. 2А). Вероятно, отсутствие здесь вида вызвано историческими, флорогенетическими причинами. Также историческими и флорогенетическими причинами можно объяснить отсутствие обоих видов в горах Средней Азии и в Гималаях, имеющих, судя по полученным моделям, достаточно высокую вероятность пригодности местообитаний для их произрастания.



А



Б

Рис. 2. Евразийский фрагмент прогнозных карт распространения *Diplazium sibiricum* на основе биоклиматических переменных BIOCLIM: А) интерполяция данных с 1970 по 2000 г.; Б) интерполяция данных с 2040 по 2060 г. Цветная шкала показывает вероятность встречи вида в данных климатических условиях. Белыми точками показана современная встречаемость вида

Fig. 2. Eurasian fragment of predictive distribution maps of *Diplazium sibiricum* based on BIOCLIM bioclimatic variables: А) data interpolation from 1970 to 2000; В) data interpolation from 2040 to 2060. The color scale shows the probability of meeting the species in given climatic conditions. White dots show the current occurrence of the species

В ходе построения потенциального ареала были выявлены биоклиматические переменные, оказывающие наибольшее влияние на пространственное распространение модельных видов папоротников (табл. 1, 2; рис. 3, 4). Одной из важных биоклиматических переменных для обоих видов является значение среднегодовой температуры (bio01). Существенное влияние на распространение *Athyrium distentifolium* оказывает количество осадков сухого месяца (bio14), а на распространение *Diplazium sibiricum* — среднегодовое количество осадков (bio12). Другие показатели меньше влияют на потенциальное распространение модельных видов (табл. 1, 2).

Таблица 1

Вклад в модель ареала *Athyrium distentifolium* биоклиматических переменных и их оптимальные значения для произрастания вида

Table 1

Contribution to the range model of *Athyrium distentifolium* of bioclimatic variables and their optimal values for the growth of the species

Биоклиматическая переменная (шифр, описание)	Вклад в модель, %	Оптимальные значения
bio01, среднегодовая температура	24,9	-6...+10
bio02, средняя дневная разница температур	0,9	2—13
bio05, максимальная температура самого теплого месяца	11,8	+11...+23
bio06, минимальная температура самого холодного месяца	0,4	-23...+1
bio07, годовой размах температур	9,6	15—48
bio12, среднегодовое количество осадков, мм	12,7	400—2750
bio14, количество осадков самого сухого месяца, мм	39,6	20—140

Таблица 2

Вклад в модель ареала *Diplazium sibiricum* биоклиматических переменных и оптимальные значения климатических факторов

Table 2

Contribution of bioclimatic variables to the range model of *Diplazium sibiricum* and optimal values of climatic factors

Биоклиматическая переменная (шифр, описание)	Вклад в модель, %	Оптимальные значения
bio01, среднегодовая температура	32,9	-10...+3
bio02, средняя дневная разница температур	0,4	8—16
bio05, максимальная температура самого теплого месяца	15,1	+18...+25
bio06, минимальная температура самого холодного месяца	0,8	-38...-12
bio07, годовой размах температур	10,2	38—67
bio12, среднегодовое количество осадков, мм	25,3	350—800
bio14, количество осадков самого сухого месяца, мм	15,3	5—40

В таблицах 1 и 2 приведены оптимальные для произрастания изученных видов значения биоклиматических переменных. Значения получены с использованием программы MaxEnt, в качестве оптимальных приняты условия, при которых вероятность встречаемости вида становилась выше 0,4. Такой выбор порогового значения, во-первых, соответствует резкому подъему кривой отклика для большинства переменных на рисунках 3 (1—7), 4 (1—7), во-вторых, соответствует достаточно четкой границе между голубым и зеленым цветами на карте распространения видов. Кроме того, при выбранном значении ареал видов на карте сужается, но не распадается на множество мелких фрагментов.

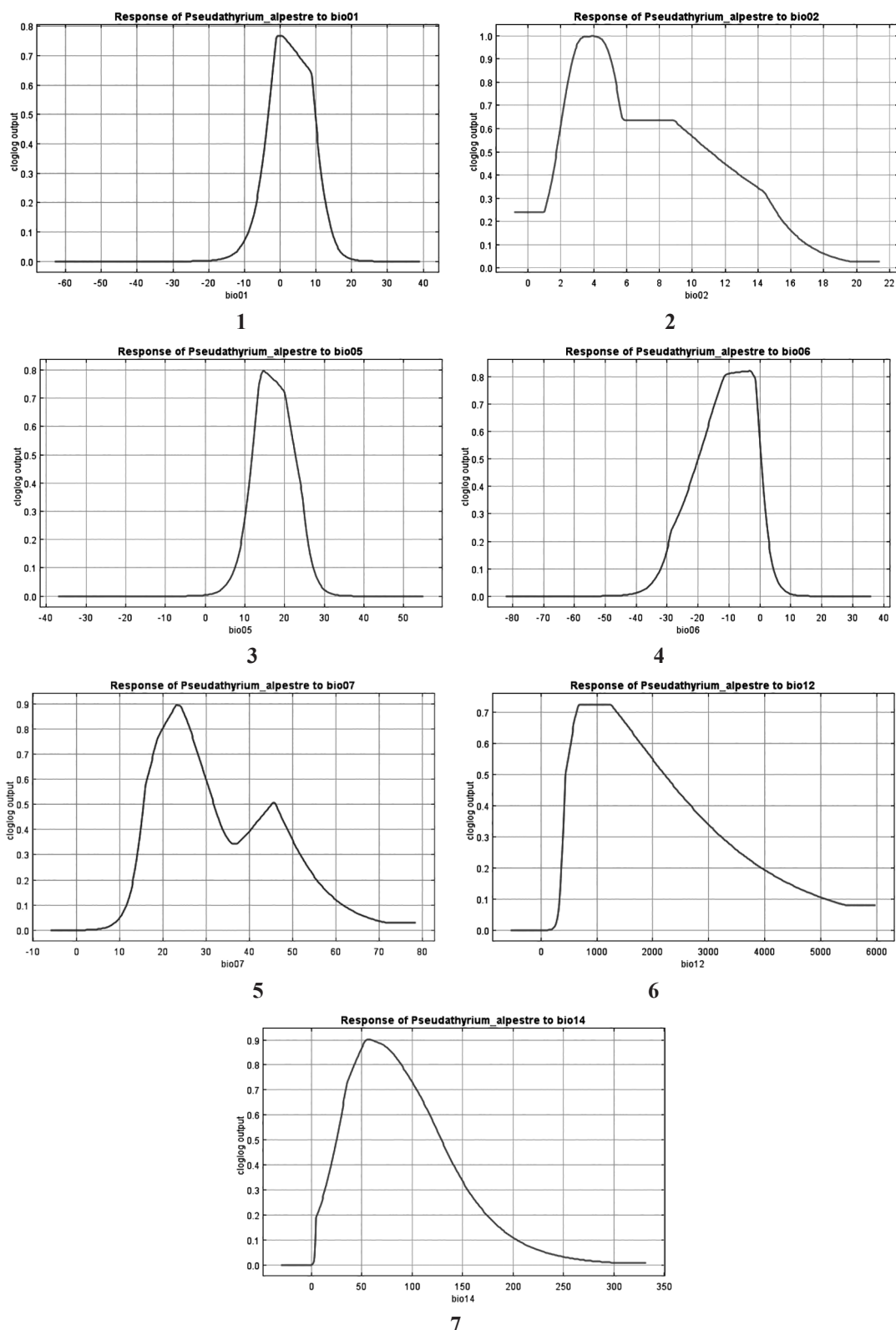


Рис. 3. Кривые отклика *Athyrium distentifolium* на биоклиматические переменные: 1 — среднегодовая температура (bio01), 2 — суточный размах температур (bio02), 3 — температура самого теплого месяца (bio05), 4 — температура самого холодного месяца (bio06), 5 — годовой размах температур (bio07), 6 — годовые осадки (bio12), 7 — осадки самого сухого месяца (bio14)

Fig. 3. *Athyrium distentifolium* responsive curves to bioclimatic variables: 1 — average annual temperature (bio01), 2 — diurnal temperature range (bio02), 3 — temperature of the warmest month (bio05), 4 — temperature of the coldest month (bio06), 5 — annual temperature range (bio07), 6 — annual precipitation (bio12), 7 — precipitation of the driest month (bio14)

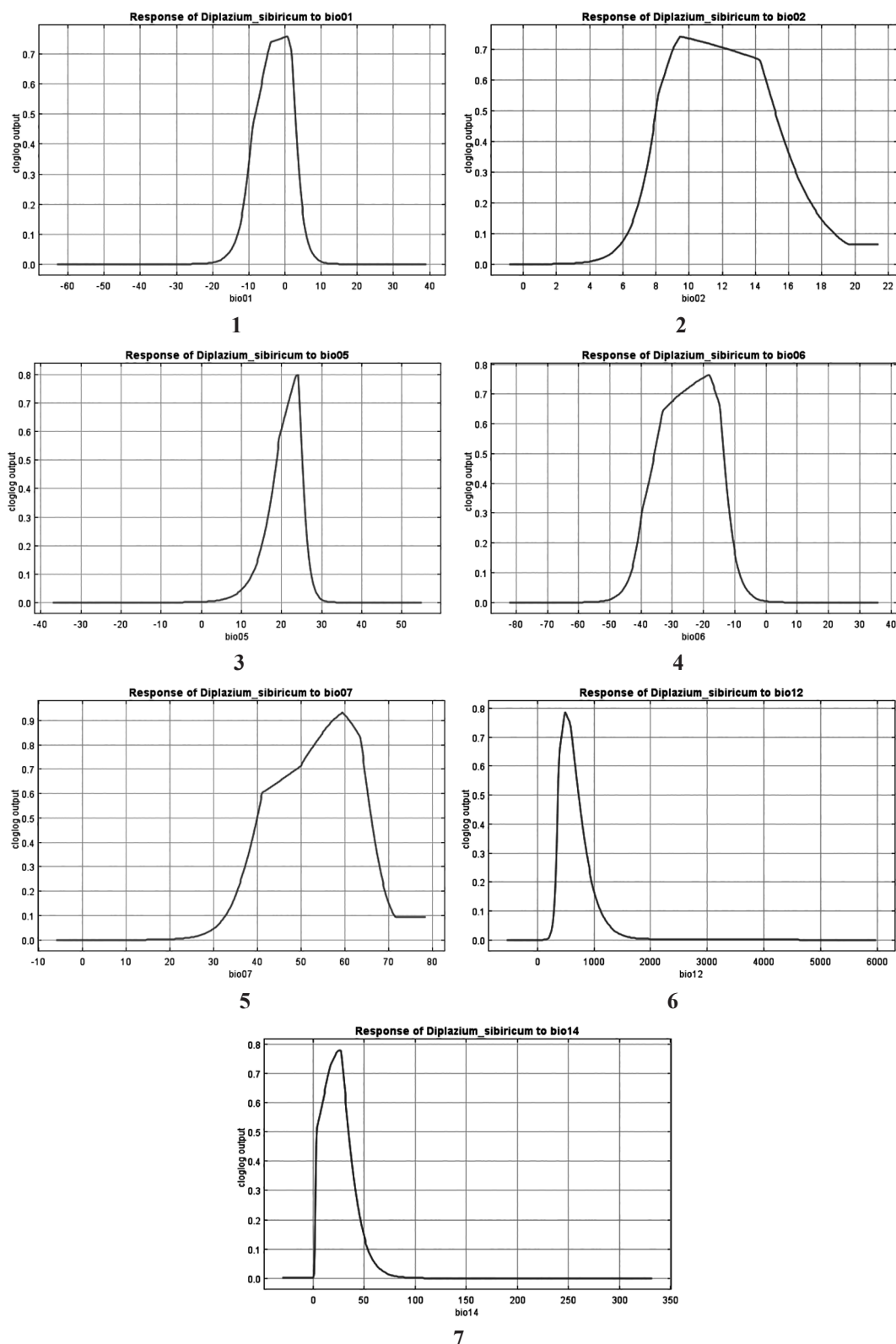


Рис. 4. Кривые отклика *Diplazium sibiricum* на биоклиматические переменные: 1 — среднегодовая температура (bio01), 2 — суточный размах температур (bio02), 3 — температура самого теплого месяца (bio05), 4 — температура самого холодного месяца (bio06), 5 — годовой размах температур (bio07), 6 — годовые осадки (bio12), 7 — осадки самого сухого месяца (bio14)

Fig. 4. *Diplazium sibiricum* responsive curves to bioclimatic variables: 1 — average annual temperature (bio01), 2 — diurnal temperature range (bio02), 3 — temperature of the warmest month (bio05), 4 — temperature of the coldest month (bio06), 5 — annual temperature range (bio07), 6 — annual precipitation (bio12), 7 — precipitation of the driest month (bio14)

Анализ полученных данных указывает на то, что модельные виды папоротников различаются по требовательности к комплексу факторов, связанных с температурой и влажностью (табл. 1, 2). Более низкие значения минимальной температуры самого холодного месяца, среднегодового количества осадков и количества осадков самого сухого месяца отмечены для *Diplazium sibiricum*. Кроме того, для диплазиума сибирского характерны более высокие значения годового размаха температуры (табл. 1, 2).

Результаты прогноза географического распространения модельных видов на 2040—2060 гг. при умеренном климатическом сценарии показывают сдвиг их ареалов на север (рис. 1Б, 2Б). На прогнозной карте видно значительное сокращение потенциального распространения *Athyrium distentifolium* на Среднеевропейской равнине и на Урале. С другой стороны, его прогнозный ареал расширяется и включает остров Новая Земля, Колымское нагорье, Корякское нагорье, полуостров Лабрадор. Модель прогнозируемого на 2040—2060 гг. ареала *Diplazium sibiricum* показывает его расширение во всей Восточной Сибири.

Заключение

Моделирование распространения видов в программе MaxEnt с использованием открытых климатических данных позволило построить карты потенциальных ареалов двух редких папоротников *Athyrium distentifolium* и *Diplazium sibiricum*. Важными биоклиматическими переменными, в наибольшей степени определяющими распространение, для *Athyrium distentifolium* оказались количество осадков сухого месяца (39,6%), затем значения среднегодовой температуры (24,9%), для *Diplazium sibiricum* — значения среднегодовой температуры (32,9%), затем среднегодовое количество осадков (25,3%). Смоделированные границы потенциального распространения видов в обоих случаях существенно шире границ их фактических ареалов. Значительное расширение прогнозируемых ареалов обусловлено исключительно учетом климатических параметров и комбинацией их переменных. Настройка алгоритмов на этапах моделирования, корректировка наборов данных, использование сведений об окружающей среде (геологической основе, структуре ландшафта, почвах и т.д.) могут предоставить полезную информацию для изучения закономерностей распространения и деликатного прогнозирования потенциальных ареалов видов и планирования адекватных мероприятий по охране редких видов и сохранению биоразнообразия.

Список источников

1. Зайков В. Ф., Ваганов А. В., Шмаков А. И. Климатическое моделирование потенциального ареала *Pulsatilla turczaninowii* Kryl. et Serg. (*Ranunculaceae*) на территории Евразии // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 140—144. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-140-144.
2. Красная книга Архангельской области. Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. 490 с.
3. Красная книга Вологодской области. Т. 2. Растения и грибы. Вологда : ВГПУ : Русь, 2004. 360 с.
4. Красная книга Ивановской области. Т. 2. Растения и грибы. Тамбов : ТПС, 2020. 256 с.
5. Красная книга Калужской области. Т. 1. Растительный мир. Калуга : Ваш Домъ, 2015. 536 с.
6. Красная книга Камчатского края. Т. 2. Растения. Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2018. 388 с.
7. Красная книга Костромской области. Кострома : Костромской гос. ун-т, 2019. 432 с.
8. Красная книга Курганской области. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 448 с.
9. Красная книга Ленинградской области: Объекты растительного мира. СПб. : ИПФ «Марафон», 2017. 840 с.
10. Красная книга Мурманской области. Кемерово : Азия-принт, 2014. 584 с.
11. Красная книга Ненецкого автономного округа. Белгород : Константа, 2020. 456 с.
12. Красная книга Нижегородской области. Т. 2. Сосудистые растения, моховидные, водоросли, лишайники, грибы. Калининград : Издат. дом «РОСТ-ДООАФК», 2017. 304 с.

13. Красная книга Новгородской области. СПб. : ДИТОН, 2015. 480 с.
14. Красная книга Пензенской области. Т. 1. Грибы, лишайники, мхи, сосудистые растения. Пенза, 2013. 300 с.
15. Красная книга Республики Мордовия. Т. 1. Редкие виды растений и грибов. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2017. 412 с.
16. Красная книга Республики Татарстан (животные, растения, грибы). Казань : Идел-Пресс, 2016. 760 с.
17. Красная книга Самарской области. Т. 1. Редкие виды растений и грибов. Самара : Изд-во Самарской гос. обл. академии (Наяновой), 2017. 384 с.
18. Красная книга Тверской области. Тверь : Тверской Печатный Двор, 2016. 400 с.
19. Красная книга Ульяновской области. М. : Буки Веди, 2015. 550 с.
20. Красная книга Чувашской Республики. Т. 2. Ч. 1. Редкие виды растений и грибов. М. : Буки Веди, 2020. 332 с.
21. Левченко Л. С., Олонова М. В. Моделирование территорий, пригодных для обитания *Allium obliquum* L., внесенного в Красную книгу Томской области, на основе климатических данных // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2021. № 20-1. С. 261—264. DOI: 10.14258/pbssm.2021050.
22. Лисовский А. А., Дудов С. В., Оболенская Е. В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 1. Общие подходы // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81, № 2. С. 123—134. DOI: 10.31857/S0044459620020037.
23. Лисовский А. А., Дудов С. В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 2. MaxEnt // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81, № 2. С. 135—146. DOI: 10.31857/S0044459620020049.
24. Мочалова О. А., Ефимов Д. Ю. Природно-климатические закономерности распространения *Sparganium emersum* и *S. hyperboreum* (Typhaceae) на северо-востоке Азии // Биология внутренних вод. 2022. № 6. С. 689—699. DOI: 10.31857/S032096522206016X.
25. Олонова М. В., Высоких Т. С., Мезина Н. С. Структура эколого-климатических ниш *Poa palustris* L. и *P. nemoralis* L. (Poaceae) на территории Азиатской России // Сибирский экологический журнал. 2018. № 6. С. 712—723. DOI: 10.15372/SEJ20180606.
26. Петросян В. Г., Осипов Ф. А., Дергунова Н. Н., Омельченко А. В. Комплекс моделей расширения ареалов самых опасных инвазионных видов растений на территории России в условиях глобальных климатических изменений // Информационные технологии в исследовании биоразнообразия : материалы III Национальной науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. РАН П. Л. Горчаковского. Екатеринбург, 2020. С. 440—443.
27. Пшегусов Р. Х., Чадаева В. А. Моделирование экологических ниш видов рода *Galinsoga* Ruiz et Rav. в границах нативного и кавказской части инвазионного ареалов // Российский журнал биологических инвазий. 2022. Т. 15, № 1. С. 107—122. DOI: 10.35885/1996-1499-15-1-107-122.
28. Санданов Д. В. Современные подходы к моделированию разнообразия и пространственному распределению видов растений: перспективы их применения в России // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 46. С. 82—114. DOI: 10.17223/19988591/46/5.
29. Санданов Д. В., Найданов Б. Б. Пространственное моделирование ареалов восточноазиатских видов растений: современное состояние и динамика под влиянием климатических изменений // Растительный мир Азиатской России: Вестник Центрального сибирского ботанического сада СО РАН. 2015. № 3 (19). С. 30—35.
30. Флора европейской части СССР. Т. 1. Л. : Наука, 1974. 404 с.
31. Флора Сибири. Lycopodiaceae — Hydrocharitaceae. Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1988. 200 с.
32. Чурюлина А. Г., Бочарников М. В. Моделирование потенциального ареала реликтового вида (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) на основе климатических данных // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 54. С. 100—108. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-100-108.
33. Cheek M. D. First official record of a naturalised population of *Mimosa albida* Humb. & Bonpl. ex Willd. var. *albida* in Africa // BioInvasions Records. 2015. Vol. 4, Is. 1. P. 61—65. DOI: 10.3391/bir.2015.4.1.10.
34. Elith J., Leathwick J. R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2009. Vol. 40. P. 677—697. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
35. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37, N 12. P. 4302—4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
36. GBIF.org (27 November 2022) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.yyhtzb>.

37. GBIF.org (27 November 2022) GBIF occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.prga3m>.
38. Petrenko T. Y., Korznikov K. A., Kislov D. E., Krestov P. V., Belyaeva N. G. Modeling of cold-temperate tree *Pinus koraiensis* (*Pinaceae*) distribution in the Asia-Pacific region: climate change impact // *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9, N 1. Art. 100015. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100015.
39. Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecological Modeling*. 2006. Vol. 190, N 3—4. P. 231—259. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
40. Qin Z., Zhang J. E., DiTommaso A., Wan R., Wu R. S. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with Maxent and GARP models // *Journal of Plant Research*. 2015. Vol. 128. P. 763—775. DOI: 10.1007/s10265-015-0738-3.
41. Thomas C. D., Cameron A., Green R. E., Bakkenes M., Beaumont L. J., Collingham Y. C., Erasmus B. F., De Siqueira M. F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., Van Jaarsveld A. S., Midgley G. F., Miles L., Ortega-Huerta M. A., Peterson A. T., Phillips O. L., Williams S. E. Extinction risk from climate change // *Nature*. 2004. Vol. 427. P. 145—148. DOI: 10.1038/nature02121.
42. WorldClim. Global climate and weather data. URL: <https://www.worldclim.org/> (Accessed: 21.11.2022).
43. Xian X., Zhao H., Wang R., Qiao H., Guo J., Zhang G., Liu W., Wan F. Ecological Niche Shifts Affect the Potential Invasive Risk of *Rapistrum rugosum* (L.) All. in China // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 827497. DOI: 10.3389/fpls.2022.827497.

References

1. Zaikov V. F., Vaganov A. V., Shmakov A. I. Klimaticheskoe modelirovanie potentsial'nogo areala *Pulsatilla turczaninovii* Kryl. et Serg. (*Ranunculaceae*) na territorii Evrazii [Climate modeling of the potential distribution area of *Pulsatilla turczaninovii* Kryl. et Serg. (*Ranunculaceae*) in Eurasia]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya — Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no. 1, pp. 140—144. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-140-144. (In Russian)
2. *Krasnaya kniga Arkhangel'skoi oblasti* [Red Book of the Arkhangelsk Region]. Arkhangelsk, Severnyi (Arkticheskii) federal'nyi universitet Publ., 2020. 490 p. (In Russian)
3. *Krasnaya kniga Vologodskoi oblasti. T. 2. Rasteniya i griby* [Red Data Book of the Vologda Region. Vol. 2. Plants and fungi]. Vologda, VGPU, Rus' Publ., 2004. 360 p. (In Russian)
4. *Krasnaya kniga Ivanovskoi oblasti. T. 2. Rasteniya i griby* [Red Book of the Ivanovo Region. Vol. 2. Plants and fungi]. Tambov, TPS Publ., 2020. 256 p. (In Russian)
5. *Krasnaya kniga Kaluzhskoi oblasti. T. 1. Rastitel'nyi mir* [Red Book of the Kaluga Region. Vol. 1. Plant world]. Kaluga, Vash Dom" Publ., 2015. 536 p. (In Russian)
6. *Krasnaya kniga Kamchatskogo kraja. T. 2. Rasteniya* [Red Data Book of the Kamchatka Territory. Vol. 2. Plants]. Petropavlovsk-Kamchatskii, Kamchatpress Publ., 2018. 388 p. (In Russian)
7. *Krasnaya kniga Kostromskoi oblasti* [Red Book of the Kostroma Region]. Kostroma, Kostromskoi gos. un-t Publ., 2019. 432 p. (In Russian)
8. *Krasnaya kniga Kurganskoi oblasti* [Red Book of the Kurgan Region]. Kurgan, Kurganskii gos. un-t Publ., 2012. 448 p. (In Russian)
9. *Krasnaya kniga Leningradskoi oblasti: Ob'ekty rastitel'nogo mira* [Red Book of the Leningrad Region: Objects of the flora]. St. Petersburg, IPF "Marafon" Publ., 2017. 840 p. (In Russian)
10. *Krasnaya kniga Murmanskoi oblasti* [Red Data Book of the Murmansk Region]. Kemerovo, Aziya-print Publ., 2014. 584 p. (In Russian)
11. *Krasnaya kniga Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Red Book of the Nenets Autonomous Okrug]. Belgorod, Konstanta Publ., 2020. 456 p. (In Russian)
12. *Krasnaya kniga Nizhegorodskoi oblasti. T. 2. Sosudistye rasteniya, mokhovidnye, vodorosli, lishainiki, griby* [Red Book of the Nizhny Novgorod Region. Vol. 2. Vascular plants, bryophytes, algae, lichens, fungi]. Kaliningrad, Izdat. dom "ROST-DOAFK" Publ., 2017. 304 p. (In Russian)
13. *Krasnaya kniga Novgorodskoi oblasti* [Red Data Book of the Novgorod Region]. St. Petersburg, DITON Publ., 2015. 480 p. (In Russian)
14. *Krasnaya kniga Penzenskoi oblasti. T. 1. Griby, lishainiki, mkhi, sosudistye rasteniya* [Red Book of the Penza Region. Vol. 1. Fungi, lichens, mosses, vascular plants]. Penza, 2013. 300 p. (In Russian)
15. *Krasnaya kniga Respubliki Mordoviya. T. 1. Redkie vidy rastenii i gribov* [Red Book of the Republic of Mordovia. Vol. 1. Rare species of plants and fungi]. Saransk, Mordovskii un-t Publ., 2017. 412 p. (In Russian)
16. *Krasnaya kniga Respubliki Tatarstan (zhivotnye, rasteniya, griby)* [Red Book of the Republic of Tatarstan (animals, plants, fungi)]. Kazan, Idel-Press Publ., 2016. 760 p. (In Russian)
17. *Krasnaya kniga Samarskoi oblasti. T. 1. Redkie vidy rastenii i gribov* [Red Book of the Samara Region. T. 1. Rare species of plants and fungi]. Samara, Samarskaya gos. obl. akademiya (Nayanovoi) Publ., 2017. 384 p. (In Russian)

18. *Krasnaya kniga Tverskoi oblasti* [Red Book of the Tver Region]. Tver, Tverskoi Pechatnyi Dvor Publ., 2016. 400 p. (In Russian)
19. *Krasnaya kniga Ul'yanovskoi oblasti* [Red Data Book of Ulyanovsk Region]. Moscow, Buki Vedi Publ., 2015. 550 p. (In Russian)
20. *Krasnaya kniga Chuvashskoi Respubliki. T. 2. Ch. 1. Redkie vidy rastenii i gribov* [Red Book of the Chuvash Republic. Vol. 2. Part 1. Rare species of plants and fungi]. Moscow, Buki Vedi Publ., 2020. 332 p. (In Russian)
21. Levchenko L. S., Olonova M. V. Modelirovanie territorii, prigodnykh dlya obitaniya *Allium obliquum* L., vnesennogo v Krasnuyu knigu Tomskoi oblasti, na osnove klimaticheskikh dannykh [Modeling of territories suitable for the habitat of *Allium obliquum* L., listed in the Red Book of Tomsk oblast, based on climatic data]. *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii — Problems of Botany of South Siberia and Mongolia*, 2021, no. 20-1, pp. 261—264. DOI: 10.14258/pbssm.2021050. (In Russian)
22. Lisovskii A. A., Dudov S. V., Obolenskaya E. V. Preimushchestva i ogranicheniya metodov ekologicheskogo modelirovaniya arealov. 1. Obshchie podkhody [Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 1. A general approach]. *Zhurnal obshchei biologii*, 2020, vol. 81, no. 2, pp. 123—134. DOI: 10.31857/S0044459620020037. (In Russian)
23. Lisovskii A. A., Dudov S. V. Preimushchestva i ogranicheniya metodov ekologicheskogo modelirovaniya arealov. 2. MaxEnt [Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 2. MaxEnt]. *Zhurnal obshchei biologii*, 2020, vol. 81, no. 2, pp. 135—146. DOI: 10.31857/S0044459620020049. (In Russian)
24. Mochalova O. A., Efimov D. Yu. Prirodno-klimaticheskie zakonomernosti rasprostraneniya *Sparganium emersum* i *S. hyperboreum* (Typhaceae) na severo-vostoke Azii [Environmental patterns of distribution of *Sparganium emersum* and *S. hyperboreum* (Typhaceae) in the North-East Asia]. *Biologiya vnutrennikh vod — Inland Water Biology*, 2022, no. 6, pp. 689—699. DOI: 10.31857/S032096522206016X. (In Russian)
25. Olonova M. V., Vysokikh T. S., Mezina N. S. Struktura ekologo-klimaticheskikh nish *Poa palustris* L. i *P. nemoralis* L. (Poaceae) na territorii Aziatskoi Rossii [The Structure of Ecological-Climatical Niches of *Poa palustris* L. and *P. nemoralis* L. (Poaceae) in the Territory of Asian Russia]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal — Contemporary Problems of Ecology*, 2018, no. 6, pp. 712—723. DOI: 10.15372/SEJ20180606. (In Russian)
26. Petrosyan V. G., Osipov F. A., Dergunova N. N., Omel'chenko A. V. Kompleks modelei rasshireniya arealov samykh opasnykh invazionnykh vidov rastenii na territorii Rossii v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh izmenenii [A set of models for expanding the ranges of the most dangerous invasive plant species in Russia under the conditions of global climate change]. *Informatsionnye tekhnologii v issledovanii bioraznoobraziya: materialy III Natsional'noi nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhd. akad. RAN P. L. Gorchakovskogo* [Information technologies in biodiversity research. Proceed. of the III National sci. conf. with Internat. participation, dedicated to the centenary of the birth of RAS academician P. L. Gorchakovsky]. Yekaterinburg, 2020, pp. 440—443. (In Russian)
27. Pshegusov R. Kh., Chadaeva V. A. Modelirovanie ekologicheskikh nish vidov roda *Galinsoga* Ruiz et Pav. v granitsakh nativnogo i kavkazskoi chasti invazionnogo arealov [Ecological niche modeling of *Galinsoga* Ruiz et Pav. Species in the native and Caucasian part of the invasive ranges]. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii — Russian Journal of Biological Invasions*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 107—122. DOI: 10.35885/1996-1499-15-1-107-122. (In Russian)
28. Sandanov D. V. Sovremennye podkhody k modelirovaniyu raznoobraziya i prostranstvennomu raspredeleniyu vidov rastenii: perspektivy ikh primeneniya v Rossii [Modern approaches to modeling plant diversity and spatial distribution of plant species: Implication prospects in Russia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya — Tomsk State University Journal of Biology*, 2019, no. 46, pp. 82—114. DOI: 10.17223/19988591/46/5. (In Russian)
29. Sandanov D. V., Naidanov B. B. Prostranstvennoe modelirovanie arealov vostochnoaziatskikh vidov rastenii: sovremennoe sostoyanie i dinamika pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenii [Spatial modeling of east-asian plant species distribution: current condition and future dynamic under climatic change]. *Rastitel'nyi mir Aziatskoi Rossii: Vestnik Tsentral'nogo sibirskogo botanicheskogo sada SO RAN*, 2015, no. 3 (19), pp. 30—35. (In Russian)
30. *Flora evropeiskoi chasti SSSR. T. 1* [Flora of the European part of the USSR. Vol. 1]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 404 p. (In Russian)
31. *Flora Sibiri. Lycopodiaceae — Hydrocharitaceae* [Flora of Siberia. Lycopodiaceae — Hydrocharitaceae]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otdelenie Publ., 1988. 200 p. (In Russian)
32. Churyulina A. G., Bocharnikov M. V. Modelirovanie potentsial'nogo areala reliktoovogo vida (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) na osnove klimaticheskikh dannykh [Modeling of the potential distribution of the relict plant species (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) based on climate data]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo*

gidrometeorologicheskogo universiteta, 2019, no. 54, pp. 100—108. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-100-108. (In Russian)

33. Cheek M. D. First official record of a naturalised population of *Mimosa albida* Humb. & Bonpl. ex Willd. var. *albida* in Africa. *BioInvasions Records*, 2015, vol. 4, is. 1, pp. 61—65. DOI: 10.3391/bir.2015.4.1.10.

34. Elith J., Leathwick J. R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, vol. 40, pp. 677—697. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.

35. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no 12, pp. 4302—4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

36. GBIF.org (27 November 2022) GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.yyhtzb>.

37. GBIF.org (27 November 2022) GBIF occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.prga3m>.

38. Petrenko T. Y., Korznikov K. A., Kislov D. E., Krestov P. V., Belyaeva N. G. Modeling of cold-temperate tree *Pinus koraiensis* (Pinaceae) distribution in the Asia-Pacific region: climate change impact. *Forest Ecosystems*, 2022, vol. 9, no. 1, art. 100015. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100015.

39. Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 2006, vol. 190, no. 3—4, pp. 231—259. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.

40. Qin Z., Zhang J. E., DiTommaso A., Wan R., Wu R. S. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with Maxent and GARP models. *Journal of Plant Research*, 2015, vol. 128, pp. 763—775. DOI: 10.1007/s10265-015-0738-3.

41. Thomas C. D., Cameron A., Green R. E., Bakkenes M., Beaumont L. J., Collingham Y. C., Erasmus B. F., De Siqueira M. F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., Van Jaarsveld A. S., Midgley G. F., Miles L., Ortega-Huerta M. A., Peterson A. T., Phillips O. L., Williams S. E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, vol. 427, pp. 145—148. DOI: 10.1038/nature02121.

42. *WorldClim. Global climate and weather data*. Available at: <https://www.worldclim.org/>. Accessed: 21.11.2022.

43. Xian X., Zhao H., Wang R., Qiao H., Guo J., Zhang G., Liu W., Wan F. Ecological Niche Shifts Affect the Potential Invasive Risk of *Rapistrum rugosum* (L.) All. in China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. 827497. DOI: 10.3389/fpls.2022.827497.

Информация об авторах

А. Д. Демин — магистрант

А. С. Третьякова — доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник

Д. Ю. Ефимов — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Information about the authors

A. D. Demin — Master's Degree Student

A. S. Tretyakova — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher

D. Yu. Efimov — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher

Статья поступила в редакцию 31.03.2023; одобрена после рецензирования 08.08.2023; принята к публикации 20.08.2023

The article was submitted 31.03.2023; approved after reviewing 08.08.2023; accepted for publication 20.08.2023