



УДК 528.9:504

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-83-96

Экологический мониторинг ареала эндемичного вида *Salvia submutica* (Lamiaceae)

К. С. Байков¹✉, Е. В. Байкова¹, О. А. Турдибоев², Н. Ю. Бешко²

¹ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт ботаники Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан

e-mail: kbaikov2018@mail.ru

Аннотация. *Salvia submutica* является одним из угрожаемых реликтовых видов шалфея Центральной Азии, локальным эндемиком Памиро-Алая. Несмотря на недавние новые находки этого вида, его ареал ограничен горным хребтом Нуратау. Популяции *S. submutica* находятся под воздействием неблагоприятных климатических факторов, их состояние может ухудшиться в условиях изменений климата. Цель настоящей работы – дать экологическую оценку ареала *S. submutica*, установить локалитеты с наилучшей комбинацией климатических показателей для выживания вида в условиях климатических изменений. Исследование представляет собой многолетний ряд мониторинговых наблюдений: они были начаты в 1990 г. и продолжаются до настоящего времени, то есть более 30 лет. Мы провели пространственный мониторинг экологической ситуации в 38 климатических и 30 геопространственных ячейках прогнозной модели по результатам моделирования ареала *S. submutica*. Модель сгенерирована в компьютерной программе MaxEnt с учетом 67 климатических переменных. Установлен мозаичный характер распространения неблагоприятных, амбивалентных и умеренно благоприятных условий обитания в границах полного ареала данного вида. Впервые для оценки пространственных закономерностей распределения локаций с разными уровнями благоприятности экологической ситуации предложено разбиение массива значений на кварталы. Установлено, что более 80 % локальных популяций данного эндемичного вида, произрастающих на участках с наиболее благоприятными условиями обитания, охраняются на территории Нуратинского природного заповедника. С учетом длительности периода наблюдений (33 года) можно считать, что выявлен основной ареал вида и обследованы наиболее крупные популяции растений. Самая крупная популяция включает менее 250 растений генеративного возраста, что, согласно критерию ограничения численности С, определяет статус изученного таксона как Endangered (EN) – находящийся под угрозой исчезновения, согласно критериям Красного списка МСОП, версия 3.1.

Ключевые слова: Нуратау, распространение, редкие виды, сохранение эндемичных видов, угрожаемые виды, Центральная Азия, шалфей, экологическое моделирование

Введение

При решении вопросов сохранения биологического разнообразия одним из приоритетов является охрана эндемичных видов,

особенно тех из них, ареал которых занимает географически ограниченную территорию. Часто такие виды являются редкими, любые неблагоприятные изменения могут вызвать их быстрое исчезновение [1, 2]. Многие

представители рода шалфей (*Salvia L.*) являются узко локальными среднеазиатскими эндемиками. Согласно последней таксономической ревизии [3], во флоре Средней Азии обнаружен 41 вид аборигенных шалфеев, 24 из которых являются эндемичными. В Узбекистане обитает 25 видов шалфеев, в том числе 2 эндемичных, в Кыргызстане – 18 видов (1 эндемичный), в Таджикистане – 27 видов (5 эндемичных), в Казахстане – 13 видов, включая 1 эндемичный, в Туркменистане – 17 видов.

Одним из наиболее интересных редких видов шалфея флоры Средней Азии является эндемик Узбекистана *Salvia submutica* Botsch. & Vved. Это чрезвычайно редкий вид, узколокальный эндемик Памиро-Алая (хребет Нуратау) [4–9]. С 1998 г. данный вид занесен в Красную книгу Узбекистана как находящийся под угрозой исчезновения [10]. *S. submutica* также включен в кадастры флор Самаркандской, Навоийской и Джизакской областей Узбекистана как редкий вид второй категории [11–13]. Реликтовый эндемик Нуратауского хребта, эндемик Узбекистана, охраняется на территории Нуратауского заповедника [14].

Нуратауский природный заповедник расположен в центральной части Нуратауского хребта в Джизакской области. Горы Нуратау возникли в палеозое в период герцинской складчатости, однако Нуратауский хребет сформировался в позднем протерозое – начале палеозоя в результате Байкальской и Каледонской складчатости. Это одни из древнейших гор Центральной Азии, почти не затронутые альпийской складчатостью. Во времена трансгрессий моря Тетис (мел – палеоген) горы Нуратау существовали как изолированные острова. Эти обстоятельства способствовали эволюции автохтонной флоры [3]. Флора этой территории включает 1 289 видов, относящихся к 503 родам и 90 семействам, из них 34 являются местными эндемиками [3, 14]. Список флоры Нуратауского заповедника включает 820 видов из 385 родов и 81 семейства [14].

Сохранение эндемичных видов становится особенно важным в контексте изменения кли-

мата. Если ухудшаются экологические условия в местах их обитания, такие виды могут оказаться под угрозой исчезновения. Для оценки степени уязвимости *S. submutica* с учетом современных трендов климатических изменений нами был применен метод компьютерного моделирования ареала методом максимальной энтропии. Цель настоящей работы – выполнить экологический мониторинг современного ареала *S. submutica*, с применением вычислительных технологий установить локалитеты с наилучшим сочетанием климатических показателей для выживания вида в условиях климатических изменений.

Материалы и методы исследования

Salvia submutica – многолетнее растение 15–20 см высотой, с одним или несколькими полурозеточными побегами, отходящими от стержневого корня, обладающего контрактильной способностью и глубоко погруженного в субстрат. Стебли одиночные или немногочисленные, редко многочисленные, прямостоячие или восходящие, с трехгранными ветвями, густо покрыты длинностебельчатыми железистыми волосками, особенно у основания и в соцветии, с примесью короткостебельчатых железистых волосков (рис. 1). Листья преимущественно собраны в базальную (так называемую прикорневую) розетку; листья в розетке многочисленные, черешчатые, продолговато-ланцетные, длиной 6–8 см, шириной 1,5–2,5 см, глубоко перисто-рассеченные (почти до средней жилки), с перисто-рассеченными острыми сегментами или долями, густо покрыты короткими железистыми волосками с примесью нежелезистых щетинистых волосков на черешке и вдоль средней жилки; срединные листья более мелкие, короткочерешчатые, перисто-рассеченные с лопастными или зубчатыми сегментами, в остальном сходны с листьями розетки; верхние листья значительно мельче, почти сидячие, с лопастной пластинкой; прицветники мелкие, продолговатые, оттянутые у основания, по текстуре не отличаются от остальных листьев, покрыты железистыми волосками. Общее соцветие (синфлоресценция) – простой или двойной тирс с несколькими частными соцветиями (пакладиями), расположенными в одной или

двух мутовках, по 1–3 паракладия в каждой; частные соцветия, не превышающие по длине основное соцветие; ложные мутовки (представляющие собой цимойды с редуцированными осями) расставленные, чаще всего 4-цветковые, реже 2-3-цветковые. Цветки на цветоножках 10–12 мм длиной. Чашечка 2,2–2,3 см длиной, ширококолокольчатая, слегка вздутая, неясно двугубая, с широкотреугольными острыми (но без шиловидной заостренности) зубцами, снаружи густо покрыта короткими железистыми волосками и сидячими железками, с примесью тонких и более длинных нежелезистых волосков преимущественно по жилкам; верхняя губа чашечки немного короче нижней, с очень маленьким средним зубцом, составляющим половину длины боковых зубцов; нижняя губа с двумя короткозаостренными зубцами. Венчик белый, трубка сильно выступает из чашечки, с кольцом волосков в горле; верхняя губа венчика немного короче нижней, прямая, с лопастями, обращенными наружу; нижняя губа с широкоэллиптическими боковыми лопастями, обращенными наружу, и широкообратнояйцевидной средней лопастью, слегка выпуклой, вывернутой наружу с обеих сторон. Тычинки выступают из трубки венчика; оба пыльника фертильные; верхнее колено связника примерно в 2 раза длиннее нижнего; тычиночные нити немного длиннее связников или почти равны им; верхние тычинки редуцированы до коротких стаминодиев с очень маленькими дугообразными стерильными пыльниками. Столбик белый, выступающий; рыльце с почти равными долями. Эремы уплощенные, эллиптически-обратнояйцевидные, 4–5 мм длиной, светло-коричневые.

Современные сведения о распространении *S. submutica* на территории исследований собраны в ходе полевых работ и ранее опубликованных данных [4–9]. Выполненное исследование представляет собой многолетнюю серию мониторинговых наблюдений: оно было начато в 1990 г. и продолжается по настоящее время, то есть на протяжении 33 лет.

S. submutica описана в 1954 г. В. П. Бочанцевым и А. И. Введенским на основе гербарных образцов, собранных в 1934 г. на

горе Койташ. По мнению Н. Ю. Бешко [3], этот вид распространен в центральной части хребта Нуратау (рис. 2) в среднегорном поясе на каменистых и щебнистых склонах. К 2018 г. было выявлено 48 локальных популяций. Основные угрозы для сохранения вида: выпас скота, заготовка местным населением растений данного вида в качестве лекарственного сырья [12]. К 2023 г. известно 62 местонахождения вида, более 40 из них выявлены при участии автора данной статьи Н. Ю. Бешко.

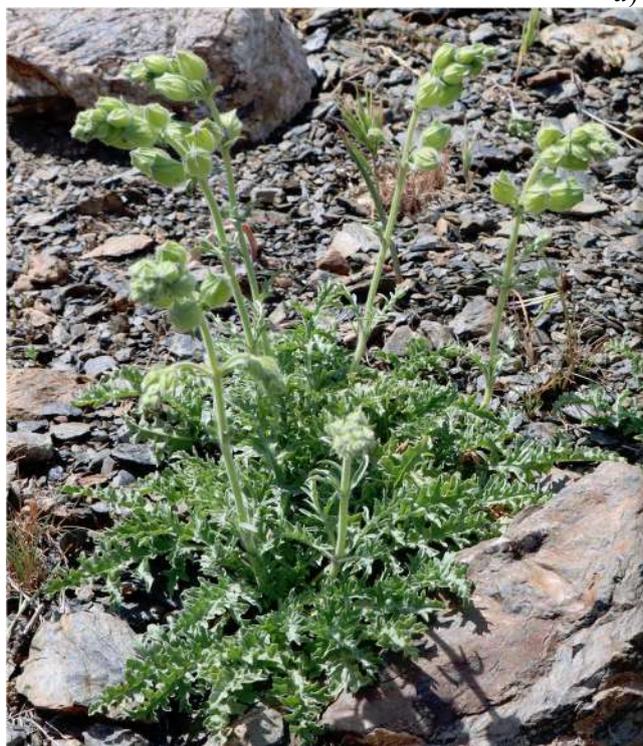
Создание пространственных моделей высокой прогностической ценности возможно только при большом количестве местонахождений видов и высокой точности определения их географических координат, что обуславливает необходимость создания специализированных банков пространственных данных и организации крупных научных проектов по картированию биологических ресурсов отдельных видов, стран и континентов, например флоры Центральной Азии [15]. В настоящем исследовании были задействованы все доступные нам данные по местонахождениям *S. submutica*, как определенные в результате собственных полевых наблюдений, так и приведенные для этого вида в публикациях и тематических базах данных «Плонтариум» и iNaturalist.

Все известные местонахождения *S. submutica* были проанализированы на предмет благоприятности среды обитания с помощью количественных методов по оригинальной методике. Было применено прямое сравнение необработанных значений прогноза с последующей многоэтапной числовой оценкой цвета ячеек в пространственных моделях. Такой способ позволил получить новые количественные критерии для экспертного выбора лучших местонахождений и лучших участков, непосредственно прилегающих к ним.

Для построения прогнозной модели ареала была применена новая версия компьютерной программы MaxEnt [16]. При выборе настроек программного обеспечения и интерпретации результатов были учтены общепринятые рекомендации [17].



а)



б)



в)

Рис. 1. *Salvia submutica* в высокогорьях Памиро-Алая (хребет Нуратау):
а) – общий вид растения в фазе цветения (фото Н. Ю. Бешко); б) бутонизации (фото О. А. Турдибова); в) соцветие (фото О. А. Турдибова)

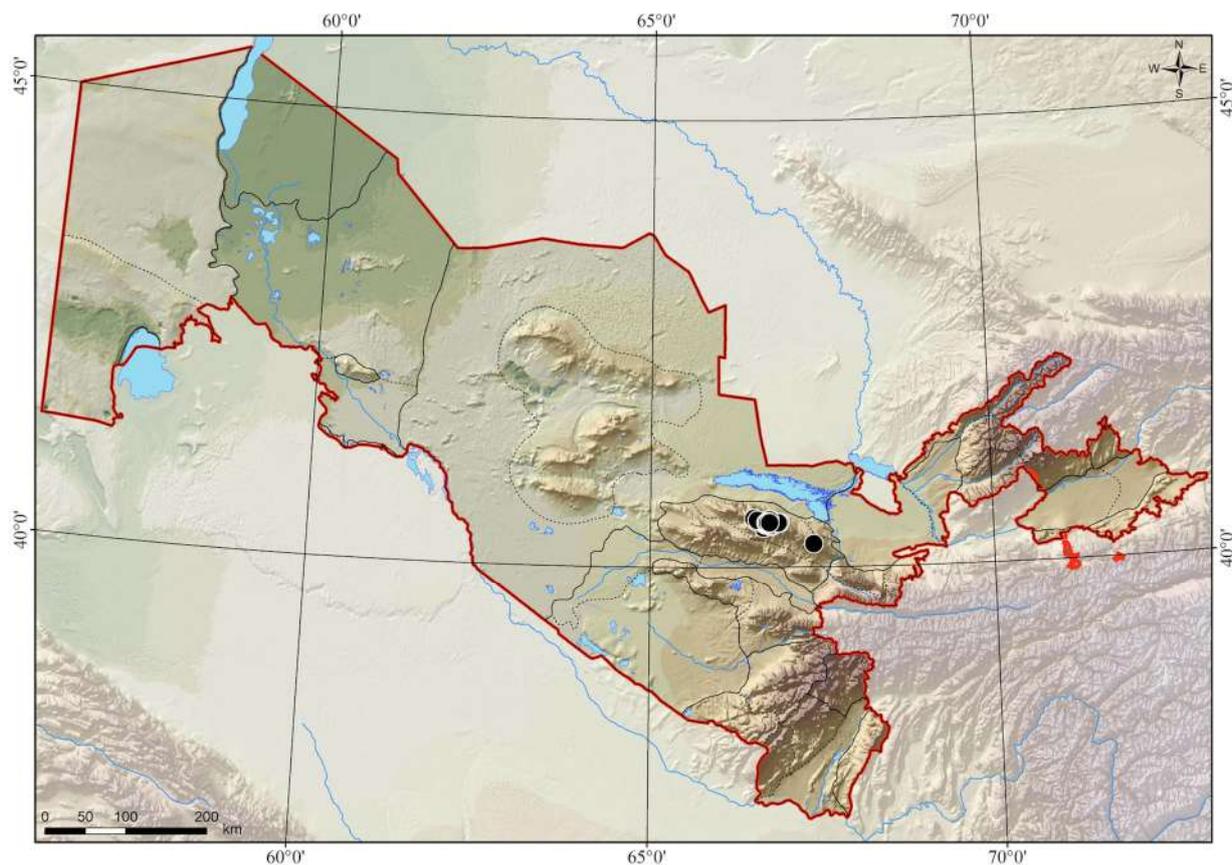


Рис. 2. Карта распространения *S. submutica* (черные точки). Красной линией обозначены границы Узбекистана

Полученные результаты и их обсуждение

При построении модели 60 местонахождений вида были размещены в соответствии с их координатами в 38 климатических ячейках (табл. 1) и 30 пространственных ячейках (табл. 2). Затем климатические ячейки были сгруппированы по пять, начиная с самых западных, в направлении к востоку. В результате такой группировки были сформированы семь кластеров, состоящих из пяти климатических ячеек, и восьмой кластер, включающий три климатические ячейки.

Таблица 1

Результаты моделирования для 38 климатических ячеек, включающих местонахождения *S. submutica*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
01	66,44	40,31	test	9,8188E-4	7,087559	0,050576	1(0)	010	0,02	
02	66,51xx	40,55xx	train	0,0149563	20,709217	0,447947	1	150	0,24	
03	66,56xx	40,53xxx	train	0,026137	31,382435	0,586432	2	261	0,42	
04	66,56xxx	40,51xxx	train	0,040890	65,687479	0,689287	3	409	0,65	
05	66,57	40,53	test	0,0282587	35,072526	0,605227	2	283	0,45	
06	66,65xxx	40,44xx	test	0,041140	66,048730	0,690592	3	411	0,66	
07	66,67xxx	40,51xxx	train	0,044153	74,49	0,705489	3	442	0,70	
08	66,68xxxx	40,49xxxx	train	0,046014	83,65	0,713993	4	460	0,73	
09	66,68xxx	40,48xxx	test	0,038159	62,22	0,674294	3	382	0,61	

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10	66,69xxxx	40,50xx	train	0,031160	37,19	0,628325	2	312	0,50	
11	66,70	40,34	train	0,003992	15,36	0,178052	1	040	0,06	
12	66,70xxx	40,49xxx	train	0,035887	54,08	0,660672	3	359	0,57	
13	66,71xx	40,48xx	train	0,048946	88,55	0,726437	4	489	0,78	
14	66,71xxx	40,50xxx	train	0,055007	94,05	0,749016	4	550	0,88	
15	66,72xxx	40,51xxx	test	0,062571	100,0	0,772450	4	626	1,00	**
16	66,72xxx	40,50xx	test	0,044719	76,36	0,708126	4	447	0,71	
17	66,72xxxx	40,50xxxx	test	0,033726	45,71	0,646613	2	337	0,54	
18	66,73xxxx	40,49xxx	train	0,043934	70,08	0,704454	3	439	0,70	
19	66,73xxx	40,52xxxx	test	0,016383	21,68	0,470573	1	164	0,26	
20	66,73xxx	40,53xxx	test	0,033167	43,42	0,642786	2	332	0,53	
21	66,74	40,48xx	train	0,033306	43,65	0,643742	2	333	0,53	
22	66,74	40,54	test	0,018351	24,93	0,498903	1	184	0,29	
23	66,74xxxx	40,51xxxx	test	0,035075	52,13	0,655520	3	351	0,56	
24	66,74xxx	40,50xxxx	test	0,026094	31,04	0,586035	2	261	0,42	
25	66,74xxxx	40,50xxxx	test	0,012107	20,21	0,396443	1	121	0,19	
26	66,75xx	40,47xx	test	0,051243	90,63	0,735457	4	512	0,82	
27	66,75xxxx	40,47xx	train	0,037673	62,0	0,671473	3	377	0,60	
28	66,75xxx	40,53xxx	train	0,017658	24,23	0,489279	1	177	0,28	
29	66,76	40,52	test	0,001037	7,59	0,053281	1(0)	010	0,02	
30	66,76x	40,46xx	train	0,037515	57,83	0,670542	3	375	0,60	
31	66,78xxx	40,48xxx	train	0,045538	79,05	0,711865	4	455	0,73	
32	66,79x	40,48xx	train	0,059528	100,0	0,763568	4	595	0,95	*
33	66,82xxx	40,51xxx	test	0,035285	52,63	0,656865	3	353	0,56	
34	66,83xxxx	40,49xxxx	train	0,031341	40,32	0,629681	2	313	0,50	
35	66,84xxx	40,50xxx	test	0,043306	69,17	0,701447	3	433	0,69	
36	66,86xx	40,50xxx	test	0,045572	79,38	0,712017	4	456	0,73	
37	66,89xxx	40,50xxx	test	0,047609	86,31	0,720901	4	476	0,76	
38	76,38xx	40,26xxx	train	0,026883	34,07	0,593220	2	269	0,43	

В табл. 1: 1 – номер климатической ячейки; 2 – значение долготы (X); 3 – значение широты (Y); 4 – проверочная (test) или обучающая (train); 5 – необработанное значение прогноза; 6 – суммарное (кумулятивное) значение прогноза; 7 – значение логистического прогноза; 8 – исходное значение прогноза $\times 10000$; 9 – номер квартиля; 10 – доля от максимального значения; 11 – экспертная оценка для лучших ячеек: ** – лучшие (максимальное значение), * – близко к лучшим (равны или более 0,95 от максимального значения).

Таблица 2

Результаты моделирования для 30 пространственных ячеек и малых полигонов, включающих местонахождения *S. submutica*

1	2	3	4	5	6
R15	5856–1–66*86	51	5,7	7/7 *	+7SS
R16	4126–2–5*763	37	4,1	6/4	+5SW
R18	763*8–5–6177	50	5,5	7/7 *	+3WW
R23	2122–4–2*767	33	3,7	6/5	+3SW
R21	3516–3–15*61	31	3,4	5/5	+3SS

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6
R02	4542-3-*5134	31	3,4	4/2	+2WW
R10	776*8-6-5767	59	6,5 *	3/2	+2WW
R24	2427-6-6*857	47	5,2	6/5	+2SW
R17	6257-6-3*856	48	5,4	6/4	+2SW
R08	6547-5-5*776	52	5,8	3/1	+2SW
R11	1112-1-1*321	13	1,4	2/1	+2SW
R22	6626-6-756*8	52	5,8	6/5	+2SE
R27	6764-6-677*8	57	6,3 *	4/3	+2SE
R12	55*87-6-1658	51	5,7	7/7 *	+2NE
R03	556*6-5-5455	46	5,1	2/2	+1WW
R19	8561-7-7*866	54	6,0	7/7 *	+1SW
R29	2216-6-1*765	36	4,0	6/4	+1SW
R25	1242-6-*7246	34	3,8	6/4	+1SW
R20	1233-5-1*631	25	2,8	5/4	+1SW
R09	7557-7-6*865	50	5,5	3/2	+1SW
R07	5616-6-57*75	48	5,3	6/5	+1SS
R13	5623-7-65*85	47	5,2	5/4	+1SS
R04	5565-5-65*65	48	5,3	1/1	+1SS
R28	4527-6-766*7	50	5,5	5/5	+1SE
R05	6554-5-555*6	46	5,1	2/2	+1SE
R06	6*775-6-5677	56	6,2 *	2/2	+1NN
R01	2211-1-*2112	13	1,4	1/1	+1EE
R14	3765-*8-5616	47	5,2	7/7 *	-7SS
R26	2456-*7-6466	46	5,1	5/2	-5NW
R30	532*6-6-6555	43	4,8	3/2	-4NE

В табл. 2: 1 – номера пространственных ячеек (Rxx), 2 – нумерограмма малого полигона (значение для центральной ячейки находится в середине нумерограммы; звездочка стоит перед лучшей ячейкой в пределах данного полигона), 3 – суммарный балл малого полигона, 4 – средний балл (звездочкой обозначены наиболее высокие значения), 5 – контрастные значения (общие/между ячейками; звездочка после самых высоких значений), 6 – значение перепада от центральной ячейки в другие стороны (NW – северо-запад; NN – север; NE – северо-восток; WW – запад; EE – восток; SW – юго-запад; SS – юг; SE – юго-восток).

Согласно сгенерированной модели (рис. 3), прогнозируемые значения вероятности обнаружения данного вида в климатических ячейках размером 0,5 × 0,5 угловых минут были отнесены к одному из четырех квартилей, созданных для всей выборки, включающей 3 240 000 климатических ячеек. Отнесение к тому или иному квартилю определялось по значениям кумулятивного прогноза, представленным в файле с результатами прогноза.

В первый квартиль вошли 8 климатических ячеек с значениями кумулятивного прогноза ниже 25,0. Две климатические ячейки (самая западная ячейка с местоположением 66444031 и ячейка шестого кластера с местоположением

66764052) имеют крайне малые значения кумулятивного прогноза (7,09 и 7,6) и по этой причине могут рассматриваться как модельные «выбросы» (outliers). Остальные шесть климатических ячеек первого квартиля попали в разные кластеры – 1, 3, 4, 5 (два) и 6. По значениям относительной вероятности, рассчитанным как текущее значение необработанного прогноза, отнесенное к максимальному значению необработанного прогноза в выборке, климатические ячейки первого квартиля имеют следующий ряд значений, расположенных в порядке возрастания: 0,06; 0,19; 0,24; 0,26; 0,28 и 0,29. В первом квартиле наибольшее значение имеет локалитет 66744054 из кластера 5.

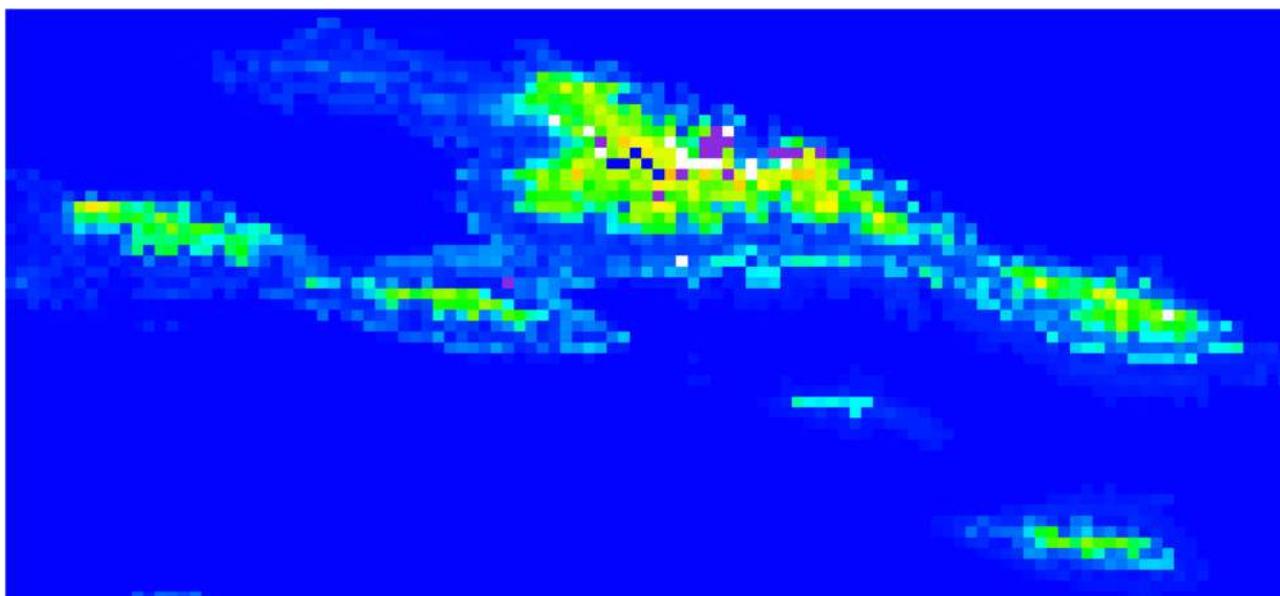


Рис. 3. Прогнозный ареал *Salvia submutica* (66,51–67,38 в. д. и 40,26–40,56 с. ш.)

Во второй квартиль вошли 9 климатических ячеек со значениями кумулятивного прогноза в диапазоне 25,1–50,0. Они относительно равномерно, по 1–2, распределены в кластерах 1, 2, 4, 5, 7 и 8, зато в кластерах 3 и 6 отсутствуют. Согласно значениям относительной вероятности, рассчитанным как текущее значение необработанного прогноза, отнесенное к максимальному значению необработанного прогноза в выборке, климатические ячейки второго квартиля имеют следующий ряд значений, расположенных в порядке возрастания: 0,42 (два образца); 0,43; 0,45; 0,50 (два образца), 0,53 (два образца) и 0,54. Во втором квартиле наибольшее значение имеет локалитет 66724051 из кластера 4.

В третий квартиль вошли 11 климатических ячеек со значениями кумулятивного прогноза в диапазоне 50,1–75,0. Они распределены по кластерам 1–7 и отсутствуют в кластере 8. Согласно значениям относительной вероятности, рассчитанным как текущее значение необработанного прогноза, деленное на его максимальное значение в выборке, климатические ячейки третьего квартиля имеют следующий ряд значений, расположенных в порядке возрастания: 0,56 (два); 0,57; 0,60 (два); 0,61; 0,65; 0,66; 0,69 и 0,70 (два). В третьем квартиле наибольшее значение имеют локалитет 66674051 из кластера 2 и локалитет 66734049 из кластера 4 (см. табл. 1).

В четвертый квартиль вошли 10 климатических ячеек со значениями кумулятивного прогноза в диапазоне 75,1–100,0. Они присутствуют в кластерах 2–4 и 6–8 и отсутствуют в кластерах 1 и 5. Согласно значениям относительной вероятности, рассчитанным как текущее значение необработанного прогноза, отнесенное к его максимальному значению в выборке, климатические ячейки четвертого квартиля имеют следующий ряд значений, расположенных в порядке возрастания: 0,71; 0,73 (три образца); 0,76; 0,78; 0,82; 0,88; 0,95; 1,00 (максимальное значение). Максимальное значение необработанного прогноза (0,0626, или 6,26 %) находится в локалитете 66724051 в кластере 3 (см. табл. 1).

Значения суммарного квартильного балла в изученных кластерах составляют с запада на восток: 9, 15, 16, 12, 9, 12, 16, 10. Этот пространственный ряд имеет два максимума – в кластерах 3 и 7.

Значения среднего квартильного балла в изучаемых кластерах составляют: 1,8; 3,0; 3,2; 2,4; 1,8; 2,4; 3,2; 3,3. По среднему квартильному баллу лидирует кластер 8, включающий три климатические ячейки. По значениям среднеквартильного балла западная часть ареала (кластеры 1–4) характеризуется несколько менее благоприятными для растений этого вида климатическими условиями по сравнению с восточной частью ареала

(кластеры 5–8), разница между ними составила 0,3 балла.

Четыре локальные популяции кластера 1 расположены на расстоянии 2–6 км друг от друга и занимают более северное положение (популяции 2–5) по сравнению с локальной популяцией, изолированной на западе и юге от них на расстоянии более чем 25 км. Ближайшие локальные популяции кластера 2 расположены на расстоянии 9–10 км. Локальные популяции кластеров 3 и 4 объединены в общий массив пространственных ячеек и образуют единую территориальную группу. Одна местная популяция была выявлена в 10 км к югу от этой группы (см. рис. 1).

Экологический статус 70 из 270 пространственных ячеек, представленных в 30 малых полигонах, оценивается как малоблагоприятный (уровни 1–3); 145 – как амбивалентный (уровни 4–6) и 55 – умеренно благоприятный (7–8). Ячейки с высокоблагоприятным экологическим статусом (уровень 9) в наборе отсутствуют. Чаще других наблюдается амбивалентный статус, переходный к умеренно благоприятному (уровень 6 – 71 ячейка), и собственно амбивалентный статус (уровень 5 – 59 ячеек). Ячейки с благоприятным экологическим статусом находятся в 10 из 30 малых полигонов. Лишь в одном случае (ячейка R14) такие условия характерны для центральной ячейки, в которой обнаружена локальная популяция изучаемого вида. В остальных случаях это ячейки, расположенные вокруг центральной ячейки малого полигона, не более двух на один полигон.

В качестве количественного показателя оценки уровня экологической пригодности малых полигонов был рассчитан средний балл как отношение суммы баллов в 9 ячейках к числу ячеек. Максимальное значение среднего балла (6,5) имеет малый полигон с центральной ячейкой R10. Еще два малых полигона имеют средний балл выше 6,0: R27 (6,3) и R06 (6,2). Экологическую ситуацию в этих трех полигонах можно оценить как переходную от амбивалентной к полублагополучной. Большинство изученных полигонов – 16 – имеют среднее значение балла в диапазоне от 5,0 до 6,0. В диапазон значений от 4,0 до 4,9 вошли три полигона, экологическая си-

туация в которых оценивалась как переходная от амбивалентной к малоблагополучной. Средний балл менее 4,0 был обнаружен в семи малых полигонах, в том числе в двух из них с очень низкими средними значениями (1,4).

Дополнительно определялся контраст уровней благоприятности в каждом из малых полигонов как разность потенциалов климатической пригодности в любой паре соседних ячеек и в целом для полигона. Установлено, что разброс коэффициента контрастности колеблется от минимального значения в одну точку в малых полигонах R01 и R04 – до семи точек в полигонах R12, R14, R15, R18 и R19.

Уровень благоприятной экологической обстановки в центральной ячейке большинства мелких полигонов (27 из 30) ниже, чем в соседних гнездовых ячейках на 1–2, реже на 3 ступени. В трех малых полигонах уровень экологической пригодности в центральной ячейке выше, чем в соседних ячейках гнезда: в R14 – на 7 ступеней, в R26 – на 5 ступеней, в R30 – на 4 ступени.

Согласно полученным результатам, наиболее подходящими для выявления новых локальных популяций растений этого вида следует считать: 1) участок ареала, примыкающий к пространственной ячейке R10 с запада; 2) часть диапазона, примыкающую с востока к пространственной ячейке R06; 3) часть диапазона, примыкающую к пространственной ячейке R27 с юга.

Выбор оптимальной модели производится поэтапно, количество шагов (максимальное количество итераций) по умолчанию установлено 500. Это значение чаще всего подходит только для простых моделей или для оценочного анализа. Для сложных моделей со многими факторами значение параметра необходимо увеличить. Очевидно, что мы не способствуем поиску оптимальной модели, прерывая анализ до его завершения. Полученную модель можно спроецировать на другие территории при условии, что для них доступны те же предикторы [17].

По градации, разработанной экспертами [18, 19], полученная модель по значению AUC соответствует оценке «отлично» – более 0,99. Это свидетельствует о том, что успеш-

ное моделирование прогнозного ареала возможно и для локальных эндемиков, характеризующихся малым размером ареала [20, 21].

Существует две стратегии отбора предикторов [22]: 1) отбирать небольшое количество предикторов, не имеющих взаимных корреляций и связанных с видом известными экологическими и физиологическими закономерностями; 2) использовать максимально обширный массив данных об окружающей среде и предоставить алгоритму анализа выбор предикторов, важных для объяснения распространения. В данном исследовании была выбрана вторая стратегия, поскольку она позволяет полностью учесть все нюансы климатической ситуации и при необходимости внести необходимые поправки в исходный код программы [23].

Учитывая длительность периода наблюдений (33 года), можно предположить, что основной ареал вида выявлен достаточно полно и исследованы его наиболее крупные локальные популяции. Самая крупная из них содержит 146 растений генеративного возраста, что по С-критерию определяет статус изучаемого таксона как «Находящийся под угрозой исчезновения» (EN) по категориям и критериям Красного списка МСОП, версия 3.1 (2013 г.). При оценке статуса таксона учитывались результаты исследований сосудистых растений других регионов [24].

Заключение

Ареал *S. submutica* представляет собой мозаичное сочетание 38 климатических ячеек, представляющих все квартили почти в равных пропорциях (8:9:11:10), с несколько большей долей третьего и четвертого квартилей.

Значения суммарного квартильного балла в 8 пространственных кластерах составили с запада на восток: 9, 15, 16, 12, 9, 12, 16, 10. Этот пространственный ряд имеет два максимума – в кластерах 3 и 7.

Уровень экологической пригодности в 30 малых полигонах, каждый из которых состоит из 9 ячеек раstra, оценивался визуальным путем усреднения значений, привязанных к 9-балльной шкале. Максимальное значение среднего балла (6,5) имеет малый полигон

с центральной ячейкой R10. Еще два малых полигона имеют средний балл выше 6,0: R27 (6,3) и R06 (6,2). Экологическую ситуацию в этих трех полигонах можно оценить как переходную от амбивалентной к почти благополучной.

Большинство изученных полигонов (16 из 30) имеют средний балл, попадающий в диапазон от 5,0 до 6,0. В диапазон значений от 4,0 до 4,9 вошли три полигона, экологическая ситуация в которых оценивалась как переходная от амбивалентной к малоблагополучной. Средний балл менее 4,0 установлен в семи малых полигонах, в том числе в двух из них с очень низкими средними значениями (1,4).

Установлены три наиболее вероятные части ареала обнаружения новых локальных популяций *S. submutica*, прилегающие с запада к пространственной ячейке R10; с востока к пространственной ячейке R06; с юга к пространственной ячейке R27.

Пятьдесят из 60 изученных объектов находятся на территории Нуратауского заповедника. Это свидетельствует о высоком уровне (более 80 % популяций) охраны вида. Части ареала вида с наиболее благоприятными условиями обитания расположены в пределах Нуратауского заповедника.

Учитывая, что период выполненных полевых наблюдений превышает 30 лет, можно считать, что ареал *S. submutica* выявлен в полной мере, обнаружены и исследованы его наиболее крупные локальные популяции. Самая крупная популяция насчитывает 146 растений и это меньше лимита в 250 взрослых растений, что по С-критерию определяет статус изучаемого таксона как «Находящийся под угрозой исчезновения» (EN) по критериям Красного списка МСОП [25].

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН № АААА-А21121011290024-5 «Биологическое разнообразие криптогамных организмов и сосудистых растений Северной Азии и сопредельных территорий, их эколого-географическая характеристика и мониторинг»

и при поддержке «Сеточного картографирования флоры Узбекистана» (на 2021–2025 гг.). Авторы благодарны куратору TASH за предоставление доступа к материалам гербария.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Callmander M. W., Phillipson P. B., Schatz, G. E., Andriambololonera S., Rabarimanarivo M., Rakotonirina N., Raharimampionona J., Chatelain C., Gautier L., Lowry II P. P. The endemic and non-endemic vascular flora of Madagascar updated // *Plant Ecology and Evolution*. – 2011. – Vol. 144, No. 2. – P. 121–125. DOI 10.5091/plecevo.2011.513.
2. Manes S., Costello M. J., Beckett H., Debnath A., Devenish-Nelson E., Grey K.-A., Jenkins R., Khan T. M., Kiessling W., Krause K., Maharaj S. S., Midgley G. F. Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance // *Biological Conservation*. – 2021. – Vol. 257: 109070. DOI 10.1016/j.biocon.2021.109070.
3. Бешко Н. Ю. Флора высших растений Нуратинского заповедника // *Тр. заповедников Узбекистана*. – Вып. 7. – Ташкент, 2011. – С. 19–78.
4. Beshko N. Endemic plants of the Nuratau Mountains (North-Western Pamir-Alay) // *Uzbek biological journal*. 2018. Vol. 4. P. 13–18.
5. Турдибоев О. А., Тургинов О. Т. Таксономический состав рода *Salvia* L. во флоре Узбекистана // *Узбекский биологический журнал*. – 2021. – № 1. – С. 34–38.
6. Введенский А. И. Новые виды из Средней Азии // *Бот. материалы гербария Института ботаники АН УзССР*. – 1954. – Вып. 14. – С. 7–12.
7. Введенский А. И. Род *Salvia* L. // *Флора Узбекистана*. – Т. 3. – Ташкент : АН УзССР, 1961. – С. 382–394.
8. Победимова Е. Г. *Salvia* L. / *Флора СССР*. В 30 т. Т. 21 ; под ред. Б. К. Шишкина. – М. – Л. : АН СССР, 1954. – С. 244–363.
9. Pobedimova, E. G. *Salvia* L. In: В.К. Schischkin (Ed.): *Flora of the U.S.S.R.* Vol. 21. Jerusalem: Keter Publishing House, 1977. – P. 178–260.
10. Махмедов А. М. Шалфеи Средней Азии и Казахстана / *Систематика, география и рациональное использование*. – Ташкент : Фан, 1984. – 112 с.
11. Махмедов А. М. Род *Salvia* L. / *Конспект флоры Средней Азии*. В 9 т. Т. 9 ; под ред. Т. А. Адьлова. – Ташкент : Фан, 1987. – С. 138–150.
12. Красная книга Республики Узбекистан. В 2 т. Т. 1 : Растения. – Ташкент : Chinor ENK, 2019. – 356 с.
13. Тожибаев К. Ш., Бешко Н. Ю., Кодиров У. Х., Батошов А. Р., Мирзалиева Д. У. Кадастр флоры Узбекистана: Самаркандская область. – Ташкент : Фан, 2018. – 220 с.
14. Тожибаев К. Ш., Бешко Н. Ю., Шомуродов Х. Ф. (2019). Кадастр флоры Узбекистана, Навоийская область. – Ташкент : Фан, 2019. – 216 с.
15. Тожибаев К. Ш., Бешко Н. Ю., Есанкулов А., Батошов А. Р., Азимова Д. Е. Кадастр флоры Узбекистана: Джизакская область. – Ташкент : Замин, 2021. – 368 с.
16. Turginov O. T., Turdiboev O. A., Khoshimov, Kh. R. Endemic species of the genus *Salvia* L. (Lamiaceae Lindl.) in flora of Uzbekistan // *Scientific Bulletin of Namangan State University*. – 2019. – Vol. 1, Is. 1. – P. 65–72.
17. Tojibaev K. Sh., Beshko N. Yu., Popov V. A., Jang C. G., Chang K. S. *Botanical Geography of Uzbekistan*. Pocheon: Korea National Arboretum, 2017. – 250 p.
18. Li W., Tojibaev K. S., Hisoriev H., Shomurodov K. F., Luo M., Feng Y., Ma K. Mapping Aia Plants: Current status of floristic information for Central Asian flora // *Global Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 24: e01220. DOI 10.1016/j.gecco.2020.e01220.
19. Phillips S. J., Anderson R. P., Dudík M., Schapire R. E., Blair M. E. (2017). Opening the black box: an open-source of Maxent // *Ecography*. – 2017. – Vol. 40, No. 7. – P. 887–893. DOI 10.1111/ecog.03049.
20. 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.

21. Araujo M. B., Pearson R. G., Thuiller W., Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change // *Global Change Biol.* – 2005. – Vol. 11, No. 9. – P. 1504–1513.
22. Fourcade Y., Besnard A. G., Secondi J. Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics // *Glob. Ecol. Biogeogr.* – 2018. – V. 27, No 2. – P. 245–256.
23. Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. E. *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. – 478 p.
24. Хапугин А. А., Силаева Т. Б., Варгот Е. В., Чугунов Г. Г., Гришуткина Г. А., Гришуткин О. Г., Письмаркина Е. В., Орлова Ю. С. Оценка таксонов первого тома Красной книги Республики Мордовия (Россия), согласно категориям и критериям Красного списка МСОП // *Nature Conservation Research. Заповедная наука.* – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 164–189.
25. IUCN Red List Categories and Criteria, version 3.1, ed. 2th. 2013. Gland and Cambridge. – 32 p.

Об авторах

Константин Станиславович Байков – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник.

Елена Валентиновна Байкова – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь.

Обиджон А. Турдибоев – аспирант, научный сотрудник.

Наталья Юрьевна Бешико – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Получено 28.02.2024

© К. С. Байков, Е. В. Байкова, О. А. Турдибоев, Н. Ю. Бешико, 2024

Ecological monitoring of the endemic species *Salvia submutica* (Lamiaceae) habitat

K. S. Baikov¹, E. V. Baikova¹, O. A. Turdiboev², N. Yu. Beshko²

¹ Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Botany, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

e-mail: kbaikov2018@mail.ru

Abstract. *Salvia submutica* is one of the threatened relict species of sage of Central Asia, local endemic to the Pamir-Alai. Despite recent new discoveries of this species, its range is limited to the Nuratau mountain range. Populations of *S. submutica* are under the influence of unfavorable climatic factors, and their condition may worsen under climate change conditions. The purpose of this work is to give an ecological assessment of the range of *S. submutica*, to establish localities with the best combination of climatic indicators for the survival of the species under climate change. The study represents a multi-year series of monitoring observations: it began in 1990 and continues to the present day, that is, more than 30 years. We conducted spatial monitoring of the ecological situation in 38 climate cells and 30 geospatial cells of the forecast model based on the results of modeling the range of *S. submutica*. The model was generated in the MaxEnt computer program taking into account 67 climate variables. The mosaic nature of the distribution of slightly favorable, ambivalent and moderately favorable living conditions within the boundaries of the full range of this species has been established. For the first time, to assess the spatial patterns of distribution of locations with different levels of favorable environmental situation, a division of the array of values into quartiles has been proposed. It has been established that more than 80% of local populations of this

endemic species, growing in areas with the most favorable habitat conditions, are protected on the territory of the Nurata Nature Reserve. Taking into account the length of the observation period (33 years), we can assume that the main habitat of the species has been identified and the largest plant populations have been surveyed. The largest population includes less than 250 plants of generative age, which, according to the population limitation criterion C, determines the status of the studied taxon as Endangered (EN) - endangered, according to the criteria of the IUCN Red List, version 3.1.

Keywords: Nuratau, distribution, rare species, conservation of endemic species, threatened species, Central Asia, sage, environmental modeling

REFERENCES

1. Callmander, M. W., Phillipson, P. B., Schatz, G. E., Andriambololonera, S., Rabarimanarivo, M., Rakotonirina, N., Raharimampionona, J., Chatelain, C., Gautier, L., Lowry II, P. P. (2011). The endemic and non-endemic vascular flora of Madagascar updated. *Plant Ecology and Evolution*, 144(2), 121–125. DOI 10.5091/plecevo.2011.513.
2. Manes, S., Costello, M.J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.-A., Jenkins, R., Khan, T. M., Kiessling, W., Krause, K., Maharaj, S. S., Midgley, G. F. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*, 257: 109070. DOI 10.1016/j.biocon.2021.109070.
3. Beshko, N. Yu. (2011). Flora of vascular plants of the Nuratau nature reserve // Proceedings of nature reserves of Uzbekistan. Iss. 7. Tashkent: Chinor ENK. P. 19–78 [in Russian].
4. Beshko, N. (2018). Endemic plants of the Nuratau Mountains (North-Western Pamir-Alay). *Uzbek biological journal*, 4, 13–18 [in Russian].
5. Turdiboev, O. A., Turginov, O. T. (2021). Taxonomical composition of the genus *Salvia* L. in the Flora of Uzbekistan. *Uzbek Biological Journal*, 1, 34–38 [in Russian with English and Uzbek summary].
6. Vvedenskiy, A. I. (1954). New species from Middle Asia. In: *Botanical materials of the herbarium of the Institute of Botany of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR*. Vol. 14. Tashkent: Publishing House of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR. P. 7–12 [in Russian].
7. Vvedenskiy, A. I. (1961). *Salvia* L. In: E. P. Korovin (Ed.): *Flora of Uzbekistan*. Vol. 3. Tashkent: Publishing House of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR. P. 382–394 [in Russian].
8. Pobedimova, E. G. (1954). *Salvia* L. In: B.K. Schischkin (Ed.): *Flora of the USSR*. Vol. 21. Moscow & Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. P. 244–363 [in Russian].
9. Pobedimova, E. G. (1977). *Salvia* L. In: B.K. Schischkin (Ed.): *Flora of the U.S.S.R.* Vol. 21. Jerusalem: Keter Publishing House. P. 178–260 [in Russian].
10. Makhmedov, A. M. (1984). Sage of Middle Asia and Kazakhstan (taxonomy, geography, and rational use). Tashkent: Fan Publishers. 112 p. [in Russian].
11. Makhmedov, A. M. (1987). *Salvia* L. In: T.A. Adylov (Ed.): *Conspectus Florae Asiae Mediae*. Vol. 9. Tashkent: Fan Publishers. P. 138–150 [in Russian].
12. Red Book of Republik Uzbekistan. (2019) Vol. 1. Plants. Tashkent. 356 p. [in Russian].
13. Tojibaev, K. Sh., Beshko, N. Yu., Kodirov, U. H., Batoshov, A. R., Mirzalieva, D. U. (2018). Inventory of the flora of Uzbekistan: Samarkand region. Tashkent: Fan Publishers. 220 p. [in Russian].
14. Tojibaev, K. Sh., Beshko, N. Yu., Shomurodov, H. F. (2019). Inventory of the flora of Uzbekistan: Navoi region. Tashkent: Fan Publishers. 216 p. [in Russian].
15. Tojibaev, K. Sh., Beshko, N. Yu., Esankulov, A., Batoshov, A. R., Azimova, D. E. (2021). Inventory of the flora of Uzbekistan: Dzhizakh region. Tashkent: Zamin nashr. 368 p. [in Russian].
16. Turginov, O. T., Turdiboev, O. A., Xoshimov, X. R. (2019). Endemic species of the genus *Salvia* L. (Lamiaceae Lindl.) in flora of Uzbekistan. *Scientific Bulletin of Namangan State University* 1(1): 65–72. [In Uzbek with English and Russian abstracts].

17. Tojibaev, K. Sh., Beshko, N. Yu., Popov, V. A., Jang, C. G., Chang, K. S. (2017). Botanical Geography of Uzbekistan. Pocheon: Korea National Arboretum. 250 p.
18. Li, W., Tojibaev, K. S., Hisoriev, H., Shomurodov, K. F., Luo, M., Feng, Y., Ma, K. (2020). Mapping Asia Plants: Current status of floristic information for Central Asian flora. *Global Ecology and Conservation*, 24: e01220. DOI 10.1016/j.gecco.2020.e01220.
19. Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudik, M., Schapire, R. E., Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893. DOI 10.1111/ecog.03049.
20. Lissovsky, A. A., Dudov, S. V. (2020). Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 2. MaxEnt. *Zhurnal Obshchei Biologii [Biology Bulletin Review]*, 81(2), 135–146. DOI 10.31857/S0044459620020049 [in Russian].
21. Araujo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., Erhard, M. (2005). Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biol.*, 11(9), 1504–1513.
22. Fourcade, Y., Besnard, A. G., Secondi, J. (2018). Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 27(2), 245–256.
23. Guisan, A., Thuiller, W., Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 478 p.
24. Khapugin, A. A., Silaeva, T. B., Vargot, E. V., Chugunov, G. G., Grishutkina, G. A., Grishutkin, O. G., Pismarkina, E. V., Orlova, Ju. S. (2017). Estimation of taxa included in the first volume of Red Data Book of the Republic of Mordovia (Russia) using the IUCN Red List Categories and Criteria. *Nature Conservation Research*, 2(1), 164–189 [in Russian].
25. IUCN Red List Categories and Criteria, version 3.1, ed. 2th. 2013. Gland and Cambridge. 32 p.

Author details

Konstantin S. Baikov – D. Sc., Senior Researcher, Chief Researcher.

Elena V. Baikova – D. Sc., Senior Researcher, Scientific Secretary.

Obidjon A. Turdiboev – Ph. D. Student, Researcher.

Natalia Yu. Beshko – Ph. D., Senior Researcher.

Received 28.02.2024

© K. S. Baikov, E. V. Baikova, O. A. Turdiboev, N. Yu. Beshko, 2024