

Экологическая оценка ареала вавиловии прекрасной (*Vavilovia formosa*, Fabaceae) в Республике Дагестан (Северный Кавказ): новые геосистемные технологии

К. С. Байков^{1*}, Е. В. Байкова¹

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

* e-mail: kbaikov2018@mail.ru

Аннотация. Предложена оригинальная методика геоэкологической оценки степени пригодности среды обитания в местах произрастания локальных популяций редкого эндемичного реликтового вида *Vavilovia formosa* (Steven) Al.Fed. в Республике Дагестан (Северный Кавказ). Особое внимание уделено разработке методических вопросов изучения состояния локальных популяций редких видов. Совершенствование методики построения прогнозных ареалов и процедуры экспертной оценки полученных результатов проиллюстрировано на примере детального анализа восточного фрагмента ареала *V. formosa* в Северном Кавказе. Выявлены комплексы лимитирующих факторов, определяющих закономерности геопространственного распределения локальных популяций на склонах разной экспозиции, крутизны и абсолютной высоты в моделях разного пространственного разрешения. Впервые предложен и реализован перевод значений исходной вероятности в новый индекс пригодности среды обитания. Данный индекс позволяет работать со значениями вероятности в виде натуральных чисел, что существенно облегчило их сравнение. Оценка предикторов по их вкладу в прогнозные модели разного пространственного разрешения убедительно показывает необходимость построения полночленной серии моделей, которая будет включать весь спектр доступных пространственных разрешений – от 1/6 до 1/120 градуса. Только такой подход позволит исследователю получить наиболее содержательную информационную основу для корректной оценки вклада предикторов с учетом уровней генерализации пространственных климатических данных. Перспективным направлением дальнейших исследований можно считать дискретизацию прогнозных значений индекса пригодности среды обитания путем разделения малых климатических участков на еще более мелкие, например, с размерностью 1/360 градуса по долготе и широте.

Ключевые слова: геоэкология, среда обитания, локальная популяция, прогнозное моделирование, *Vavilovia formosa*, Республика Дагестан, Северный Кавказ

Введение

Представление о постоянно изменяющихся условиях среды и, как следствие этого, изменениях эколого-географической структуры ареалов прочно вошло в учение о виде и видообразовании. Оба современных подхода – молекулярно-филогенетический и экологическое моделирование ареалов – стали одновременно и методами генерации научных гипотез, и методами их проверки, соединившись в методологию филогеографии [1, 2]. Важнейшим принципом такого объединения стала независимость друг от друга этих двух научных направлений, что позволило проводить независимую экспертизу полученных результатов и выводов.

За последние 10 лет мониторинга природных популяций была выявлена единственная

новая точка регистрации вавиловии прекрасной (*Vavilovia formosa* (Steven) Al.Fed.) в Дагестане [3], что свидетельствует о редкости данного вида и высокой степени изученности его ареала [4, 5]. В целом в пределах кавказской региональной группы локальных популяций выявлено сокращение их числа [6]. При этом представленный в региональных Красных книгах перечень лимитирующих факторов, ограничивающих распространение вавиловии, требует экспериментальной верификации. Важно понимать, что ключевую роль в сокращении ареала и его фрагментации играют климатические факторы среды обитания, которые не могут быть установлены натурно, но могут быть определены экспериментально, в рамках экологического моделирования [7]. Учитывая малые размеры большинства природных популяций данного вида,

логично предположить, что его климатический оптимум в данном случае будет ограничен узкой полосой высокогорной растительности на стыке собственно высокогорного петрофитона и расположенных выше щебнистых осыпей и пустошей [8]. Высокая требовательность растений данного вида к среде обитания затрудняет их успешную интродукцию не только за пределами ареала вида, но и в его границах [9, 10].

Для разработки мер охраны природных популяций важное значение имеет возможность количественной оценки пригодности среды обитания на участках, непосредственно прилегающих к месту нахождения локальной популяции. Такая оценка позволяет решить следующие задачи: 1) установить положение участков с наиболее высокими значениями интегрального индекса пригодности среды обитания относительно положения локальной популяции; 2) определить степень контрастности экологических факторов на участках, прилегающих к месту нахождения локальной популяции; 3) рассчитать относительную вероятность нахождения новой локальной популяции; 4) установить потенциальные границы обитания локальной популяции; 5) составить прогноз относительного генетического полиморфизма для каждой локальной популяции; 6) оце-

нить возможность обмена генетическим материалом между соседними локальными популяциями.

Целью данного исследования стало совершенствование методики построения прогнозных ареалов и процедуры экспертной оценки полученных результатов на примере детального анализа восточного фрагмента ареала *Vavilovia formosa* в Северном Кавказе, выявление комплекса лимитирующих факторов, определяющих закономерности пространственного распределения локальных популяций на склонах разной экспозиции, крутизны и абсолютной высоты.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили все точки регистрации растений данного вида в природе, известные по опубликованным данным и гербарным коллекциям [6, 11]. Северо-Кавказский территориальный выдел ареала вида представлен на рис. 1. Модельный фрагмент ареала выбран в границах 41.217–41.292 с.ш. и 47.667–47.867 в.д., где расположены 11 пунктов регистрации вида (на рис. 2 они показаны красными точками). Градусная сетка с шагом 0.008333 градуса нанесена с использованием веб-сервиса Google Maps [12].

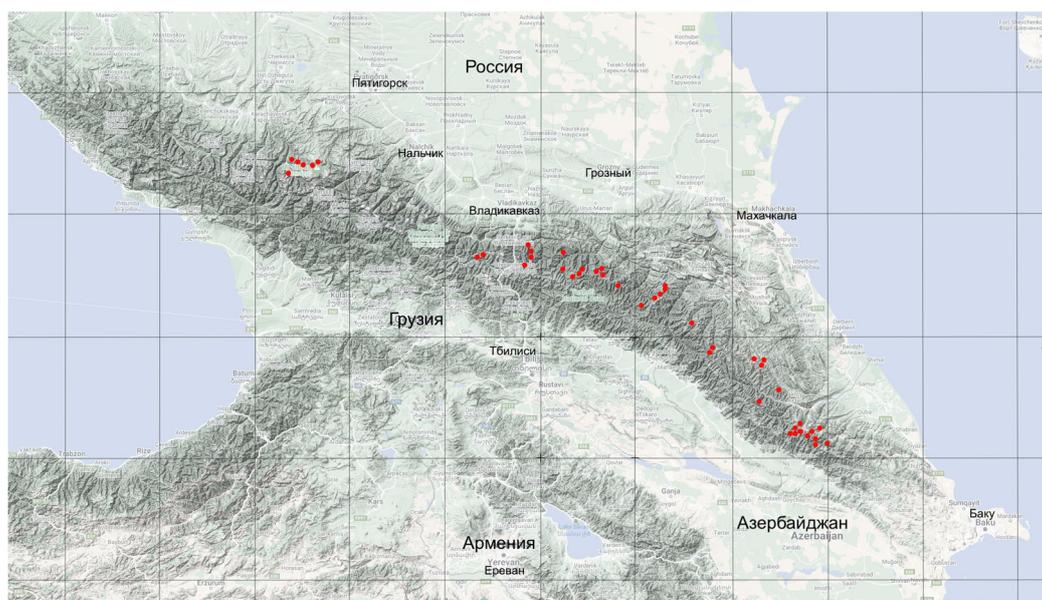


Рис. 1. Северо-Кавказский территориальный выдел ареала *Vavilovia formosa*. Красными кружками отмечено положение точек регистрации вида. Синим контуром отмечена модельная территория

В последние годы нами было выполнено моделирование ареалов значительного числа таксонов в разных масштабах (глобальный и региональный) с различной детализацией (1/120, 1/24, 1/12, 1/6 градуса) и предложен ряд приемов для проведения экспертной оценки полученных результатов. В качестве методической основы был задействован метод максимальной энтропии и его компьютерная реализация MaxEnt [13]. Для выполнения экспертной оценки результатов моделирования нами были апробированы инструмент малого полигона и балльная оценка цветовой шкалы растрового изображения прогнозной модели для определения уровней пригодности среды обитания [11, 14]. В данной работе продолжено совершенствование процедуры эксперимента и впервые в завершённом виде представлены два новых аналитических инструмента: индекс пригодности среды обитания (ИПСО) и индекс гетерогенности среды (ИГС). Два этих показателя позволяют проводить корректную количественную и качественную оценку любых участков, где расположены точки регистрации видов.

В данном исследовании впервые предложен и реализован корректный пересчет значений простого прогноза (raw prediction values) в более наглядные и операциональные значения ИПСО для участков карты с размером каждого участка 1/120 градуса по долготе и 1/120 градуса широте.

Другой инновацией стало разделение всего массива кумулятивных значений (cumulative prediction values) на квартили и выделение четырех градаций степени пригодности среды обитания: высоко пригодные условия (4-й квартиль; кумулятивные значения находятся в интервале 75.0–100.0), умеренно пригодные (3-й квартиль; кумулятивные значения от 50.0 до 75.0), мало пригодные (2-й квартиль; кумулятивные значения от 25.0 до 50.0) и условно непригодные условия среды обитания (1-й квартиль; кумулятивные значения ниже 25.0).

Исходные прогнозные значения (raw prediction values) мы рекомендуем задействовать для установления таких отношений, как кратность повышения или понижения количественных показателей пригодности среды

обитания, а также для их пересчета в индекс пригодности среды обитания ИПСО. В данной статье значения ИПСО получены умножением исходных прогнозных значений на 10 000, что позволило работать с ними как с натуральными числами. Интервал варьирования значений ИПСО в этом случае укладывается в отрезок от 0 до 1 000. Индекс гетерогенности среды (ИГС) вокруг изученных популяций рассчитан как разница максимального и минимального значений ИПСО, отнесенная к среднему значению ИПСО для окрестностей локальной популяции.

Установление на местности точных границ, в пределах которых реализуется конкретное значение ИПСО, выполнено по значениям сети координат с шагом 1/120 градуса. Это позволило достичь высокой точности в определении экспозиции и крутизны склонов и их влияния на градиенты значений ИПСО.

Сравнительный анализ результатов исследования

Совершенствование методики учета показателей пригодности среды обитания для серии модельных объектов [11, 14] позволило осуществить переход с цветowych шкал на более точные количественные индексы, имеющие значительно более высокую прогностическую ценность. Так, усредненные цветowe показатели ячеек растровых моделей были заменены на модельные значения потенциальной вероятности присутствия вида в малой ячейке климатических слоев. Уменьшение размера учетной площадки позволило нам связать экологические оптимумы локальных популяций с ориентацией и крутизной горных склонов, а также оптимальной высотой над уровнем моря для склонов разной экспозиции.

Достигнутая предельно малая размерность учетных климатических ячеек дала возможность установить высотный коридор, в котором находится экологическая ниша исследованного вида. Ширина этого коридора зависит от экспозиции и крутизны склона и составляет от 600 до 1 800 м н.у.м. Переход от участков с непригодными условиями обитания к мало-

пригодным происходит в узком интервале высот – от 2 600 до 2 700 м н.у.м. и выявлен локально, только на границе некоторых смежных участков в распадках Рагданчая и Вахчаг-

чая (рис. 2). Переход от мало пригодных условий обитания к умеренно пригодным также происходит локально, но в более широком интервале высот – от 2 800 до 3 000 м н.у.м.

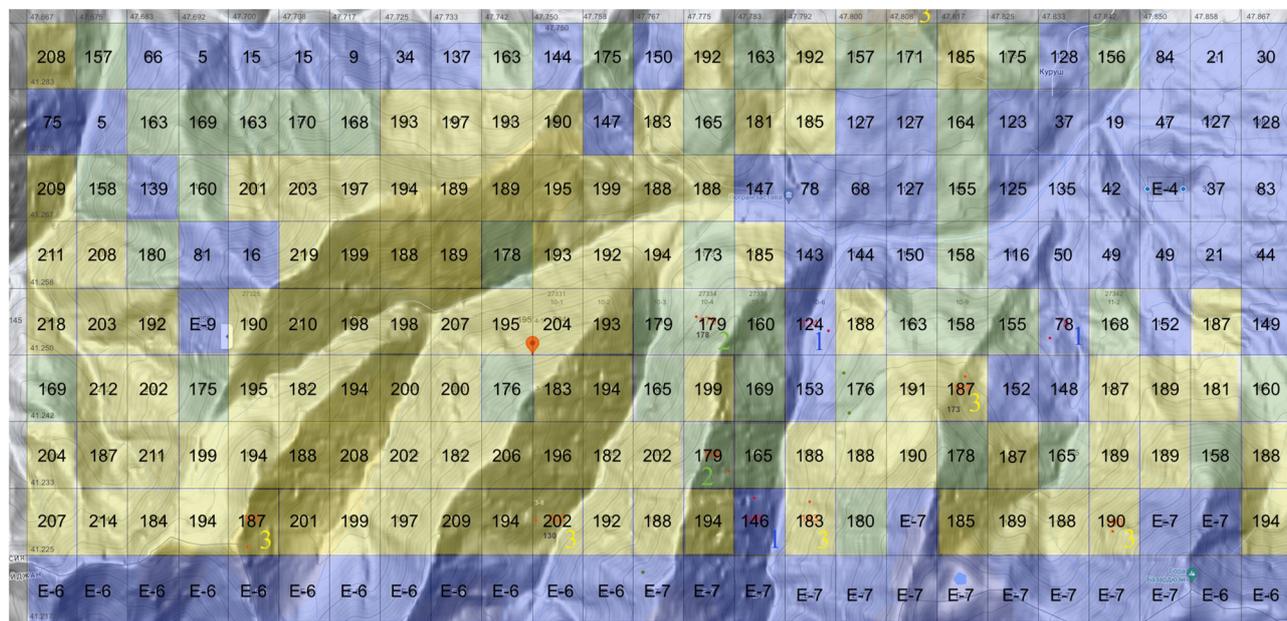


Рис. 2. Фрагмент прогнозного ареала вида в разрешении 1/120 градуса (обсуждение в тексте). Желтым полупрозрачным фоном выделены пространственные ячейки со значениями ИПСО, соответствующими третьему квартилю (умеренно пригодные условия обитания); зеленым – второму квартилю (малопригодные), синим – первому квартилю (непригодные условия обитания).

В данном исследовании был задействован весь спектр предикторов температуры приземного слоя воздуха и атмосферных осадков, представленных по многолетним данным в их сезонной динамике [15], что позволило получить наиболее пространственно детализированный прогнозный ареал вида.

На обследованном фрагменте ареала вида оптимальные климатические условия реализованы в интервалах высот 3 000–3 200 м н.у.м. на склонах западной экспозиции и 2 800–3 000 м н.у.м. на склонах восточной экспозиции. Согласно сгенерированным прогнозным значениям, локальные популяции данного вида обитают преимущественно в условиях, оцененных как малопригодные. Более половины локальных популяций (6 из 11) обитают в умеренно пригодных условиях, которые по значению кумулятивного индекса попадают в третий квартиль (183; 184; 187; 187; 190; 202). Три локальные популяции обитают в не-

пригодных условиях среды (78; 124; 146), еще две – в мало пригодных и переходных к умеренно пригодным (179; 179). Для каждой локальной популяции определены количественные характеристики смежных участков малой размерности, собранные по девять в малые полигоны [11]. В малых полигонах выбраны участки, которые характеризуются более высокими, чем в центре, значениями интегрального индекса пригодности среды обитания (ИПСО). Так, для Мулларчайской, наиболее высоко расположенной локальной популяции (3 720 м н.у.м.; 190 баллов), это смежный участок, расположенный ниже по склону в северо-восточном направлении. Для Чехычайской локальной популяции такой участок расположен выше по склону, в сторону запад-северо-запад. Для Рагданчайской группы локальных популяций такие участки расположены преимущественно ниже по склону, в сторону восток-северо-восток. Наконец, для

окрестностей Вахчагчайской локальной популяции наиболее пригодные условия среды установлены для участка, на котором она непосредственно и расположена.

Для участка с точкой регистрации 41.229 с.ш. и 47.750 в.д. установлено самое высокое значение ИПСО (202 баллов) по сравнению с другими локальными популяциями на изученном фрагменте ареала вида. В количественном выражении, это значение ИПСО превысило следующее за ним в порядке убывания на 6,4 % (ИПСО = 190 для участка с точкой регистрации 41.228 с.ш. и 47.845 в.д.), а минимальное – в 2,56 раза (ИПСО = 78 баллов для участка с точкой регистрации 41.252 с.ш. и 47.834 в.д.). Данные примеры демонстрируют высокую точность, с которой может быть выполнен расчет прироста или снижения уровня пригодности среды обитания при сравнении любых участков малой размерности.

Важно, что малые участки можно корректно объединять в сопоставимые группы и проводить их последующее сравнение между собой. В частности, как и в наших

предыдущих публикациях [11, 14], возможно применение способа сравнения малых полигонов, состоящих из девяти смежных участков, с расчетом суммарного и среднего баллов. Так, малый полигон, включающий участок с точкой регистрации локальной популяции 41.229 с.ш. и 47.75 в.д., по сумме значений ИПСО и среднему баллу заметно уступает по данному показателю расположенным рядом с ним другим малым полигонам. Это подтверждает наш тезис о том, что само по себе значение ИПСО для участка, где находится локальная популяция, еще не характеризует в полной мере климатическую обстановку, в которой существует данная популяция. По меньшей мере, должны быть приняты в расчет как средний балл для малого полигона, так и близость точки регистрации вида к границам участка.

На изученном фрагменте ареала значение ИГС варьирует от 0.22 (низкий уровень гетерогенности, табл. 1) до 1.86 (высокий уровень гетерогенности). В пределах изученной выборки отсутствуют значения ИГС в интервале от 0.40 до 1.55.

Таблица 1

Оценочные показатели пригодности среды обитания локальных популяций *Vavilovia formosa*

X	Y	RP	CP	LP	Q	A	Ex	G	H	L	ИН
47.703	41.225	0.0187252	52.69	0.7377	3	3720	E	45	201 E	E-6	1.55
47.750	41.229	0.0202504	66.46	0.7647	3	3120	E	40	206 NW	E-6	1.55
47.777	41.254	0.0179823	49.01	0.7234	2	2780	NW	15	199 S	160	0.22
47.782	41.235	0.0179693	47.21	0.7231	2	3200	E	45	202 W	146	0.31
47.786	41.232	0.0146534	20.69	0.6491	1	2720	E	20	194 W	E-7	1.65
47.796	41.231	0.0183276	51.37	0.7301	3	2840	W	30	188 N,NE	E-7	1.60
47.798	41.252	0.0124812	13.03	0.5901	1	2560	NW	20	188 E	124	0.40
47.814	41.295	0.0184275	51.70	0.7320	3	2990	SW	25	185 SE	-	-
47.821	41.247	0.0187943	53.13	0.7389	3	3030	NE	30	191 W	152	0.23
47.834	41.252	0.0078934	07.35	0.4311	1	2550	NE	15	187 SE	49	0.31
47.845	41.228	0.0190244	54.60	0.7432	3	3470	NW	45	190 C	E-7	1.86

В табл. 1: X – долготная характеристика точки регистрации; Y – широтная характеристика точки регистрации; RP – значение сырого предсказания; CP – значение суммарного предсказания; LP – значение логистического предсказания; Q – квартиль; A – высота над уровнем океана; Ex – экспозиция склона; G – уклон в градусах; H – максимальное значение ИПСО в окрестностях с указанием положения участка относительно локальной популяции; L – минимальное значение ИПСО в окрестностях локальной популяции; ИН – значение индекса гетерогенности среды.

Обсуждение полученных результатов

Локальные популяции данного вида с большим трудом могут быть найдены даже в ранее выявленных точках регистрации. Мы считаем, что это вызвано несколькими причинами: 1) крайняя труднодоступность мест обитания вида; 2) малочисленность особей в популяции; 3) малые размеры растений; 4) мимикрия – особенности окраски листьев позволяют растениям легко сливаться с окружающими камнями; 5) короткий период вегетации растений; 6) краткие сроки цветения растений; 7) значительная подвижность крутых каменистых осыпей, на которых поселяются растения данного вида; 8) почти полное отсутствие опылителей, обеспечивающих перекрестное опыление растений.

В отличие от возможности оценки пригодности среды обитания по цветовой шкале, количественная оценка экологической обстановки по значениям предсказания (raw prediction, cumulative prediction, logistic prediction, cloglog prediction) позволяет существенно повысить точность прогноза при сопоставлении результатов моделирования. В результате проведенного исследования установлено, что разные шкалы могут быть рекомендованы для применения при решении различных задач. Так, шкала суммарного предсказания (cumulative prediction) лучше подходит для первичной группировки локалитетов по квартилям, где пограничными значениями выступают 25.0, 50.0 и 75.0. Логистическая форма представления предсказанных значений может быть рекомендована для их более дробного ранжирования, чем на квартили. Корректный перевод таких рангов в оттенки цветовой шкалы возможен только для прогнозов, рассчитанных с разрешением 1/12 градуса, поскольку только в этом масштабе размер ячейки растра совпадает с размером ячейки климатических данных и, следовательно, оттенки цветовой шкалы будут строго соответствовать конкретному числовому значению исходного прогнозного значения, рассчитанному методом максимальной энтропии.

Основным ограничением в интерпретации пространственных моделей, построенных в масштабе 1/12 градуса, необходимо считать

их среднюю детализацию, которая не позволяет отразить в прогнозных значениях такие различия мест обитания, как рельеф и микроклимат. Данное исследование подтверждает тезис о том, что даже масштаб 1/120 градуса – предельно крупный из имеющихся в открытых источниках климатических данных, не всегда позволяет раскрыть в деталях специфические потребности растений конкретного вида. Большим подспорьем в таком исследовании могли бы стать растровые модели, реализованные в масштабе 1/120 градуса. Однако их текущая реализация – в масштабе 1/12 и 1/13.33 градуса для всей земной поверхности и 1/60 градуса для отдельного региона – не удовлетворяет возросшим требованиям к точности прогноза.

Влияние масштаба исследования на результаты экологического моделирования, наряду с неравномерным распределением выборки данных о локализации природных популяций, представляет собой важную методическую задачу, определяющую успешность применения разнообразных алгоритмов в вопросах построения прогнозных моделей распространения видов [16]. В этой связи масштабирование таких исследований, их реализация в максимально подробном формате открывает принципиально новые возможности изучения ареалов, их пространственной организации как фундаментальной эколого-географической характеристики вида [17]. Получение пространственных моделей с линейным разрешением для учетных единиц менее 1 км позволяет вплотную приблизиться к представлению о ландшафтно обусловленной специфике в размещении локальных популяций вида и пониманию ареала как географической проекции экологической ниши Г. Хатчинсона [18] как функции, определяемой по комбинации факторов среды. Это и обусловило возможность появления и продуктивного развития экологического моделирования как самостоятельного научного направления [19]. Важно понимать, что сами точки регистрации вида, выступающие в качестве отправной сети связанных данных о пригодности среды обитания как сложной мозаики геоинформационных данных, в случае использования учетных климатических

ячеек с одним (!) значением для каждой климатической переменной, представляют собой, по-прежнему, ряды дискретных значений, лишь имитирующих свойство непрерывности. Подобная аппроксимация еще не есть собственно континуальность климата. Приведенные выше причины недостаточно полного выявления локальных популяций, связанные с их биологическими особенностями, накладываются на неравномерность изученности ареала, обусловленную труднодоступностью отдельных фрагментов ареала. Это в полной мере относится к ареалу *V. formosa*. Естественно, сохраняется проблема точной «посадки» популяций на местность по информации, содержащейся в текстах гербарных этикеток, не имеющих детальной координатной привязки [20]. Это ограничение затрагивает все (!) прогнозные модели, независимо от их детализации.

Сокращение спектра переменных до 19 биоклиматических предикторов приводит к потере информационных деталей, позволяющих точнее интерпретировать пригодность окружающей среды на малых фрагментах ареала, обладающих ландшафтной спецификой. Этот подход соответствует такой стратегии выбора предикторов, когда экологические и физиологические закономерности изучаемых организмов еще предстоит выявить. В этом случае рекомендуется использовать максимально полный набор предикторов, наиболее полно описывающий среду обитания вида, и затем оценить значение каждого из них по их вкладу в результирующую модель [16, 21, 22].

Влияние неоднородности мест обитания на пространственное распределение локальных популяций изученного вида может быть оценено по глобальным данным о гетерогенности среды обитания [23]. Мы предлагаем проводить оценку неоднородности среды по значениям ИПСО, отражающим градиенты пригодности среды обитания на смежных участках местности. В этом случае необходимо установить положение границ с наиболее заметными перепадами значений ИПСО.

Шесть из 11 локальных популяций, найденных в границах изученного фрагмента ареала, расположены на склонах восточной

и северо-восточной экспозиции: на высотах от 2 550 м до 3 720 м н.у.м. (см. табл. 1). Две популяции, расположенные в нижней части высотной колонки, согласно прогнозным значениям, обитают в собственно неподходящих условиях окружающей среды (нижний квартиль): локальная популяция с координатами 47.834E 41.252N (ИПСО = 78, минимальное в изученной выборке) и локальная популяция 47.786E 41.232N (ИПСО = 146). Они расположены на склонах с относительно малым уклоном – 15–20 градусов. В окрестностях первой популяции наиболее подходящие условия среды обитания характерны для участка, расположенного юго-восточнее (ИПСО = 187; скорее подходящие условия). В окрестностях второй популяции более подходящие условия среды обитания характерны для участка, расположенного к западу (ИПСО = 194; скорее подходящие условия). Четыре популяции расположены в средней и верхней частях высотной колонки: три из них, согласно полученной модели, обитают в скорее подходящих условиях окружающей среды (квартиль, примыкающий к верхнему), одна популяция – в скорее неподходящих условиях окружающей среды (квартиль, примыкающий к нижнему). Точка регистрации с координатами 47.703E 41.225N расположена в верхней части высотной колонки (3 720 м) на склоне с большим уклоном (45 градусов), на участке, уровень пригодности среды обитания которого соответствует умеренно пригодному (ИПСО = 187). В ее окрестностях наиболее перспективный участок расположен к востоку и имеет ИПСО = 201.

Другие локальные популяции, расположенные на склонах восточной или северо-восточной экспозиции, обитают в полосе высот от 3 030 м до 3 200 м н.у.м. с уклонами 30–45 градусов и значениями ИПСО от 179 до 187. В окрестностях локальной популяции с координатами 47.821E 41.247N (3030 м) наиболее пригодные условия среды обитания рассчитаны для участка, расположенного западнее (ИПСО = 191). В окрестностях локальной популяции с координатами 47.782E 41.235N (3200 м) наиболее пригодные условия среды обитания рассчитаны для участка, также расположенного западнее (ИПСО = 202). Уча-

сток, на котором расположена локальная популяция с координатами 47.750E 41.229N (3120 м), характеризуется наиболее пригодными для данного фрагмента ареала вида условиями среды (ИПСО = 202). В направлении на северо-запад от него находится участок с самым высоким значением показателя пригодности среды обитания из всех участков, составляющих окрестности локальных популяций (ИПСО = 206). Следовательно, можно сделать вывод о том, что все изученные локальные популяции обитают в условиях ниже уровня высоко пригодных для данного вида. Переход на этот уровень соответствует значению ИПСО = 210. Несколько участков с ИПСО = 210 и выше встречаются в западной части изученного фрагмента ареала, но локальные популяции на этих участках не обнаружены. Возможно, это связано с трудной доступностью этих участков, находящихся в верховьях реки Мулларчай и ее левого притока. Но и там значения ИПСО не превышают 220 (см. рис. 2).

Оставшиеся пять локальных популяций обитают на склонах северо-западной (три), реже западной или юго-западной экспозиции (по одной), в интервале высот от 2 560 м до 3 470 м н.у.м. с уклонами 15–30 градусов, редко более. Здесь также наблюдается заметное варьирование значений ИПСО, но пределы варьирования меньше (124–190, то есть в 1,5 раза), чем для участков восточной и северо-восточной экспозиции (78–202, то есть в 2,6 раза). Примечательно, что самый низко расположенный участок имеет наименьшее значение в ряду (ИПСО = 124 на высоте 2 560 м), а самый верхний участок ряда – наибольшее значение (ИПСО = 190 на высоте 3 470 м). Сходная тенденция наблюдается в ряду локальных популяций, обитающих на склонах восточной и северо-восточной экспозиции, за исключением участка, расположенного выше остальных – на высоте 3 720 м н.у.м. Это свидетельствует о том, что верхний предел оптимальных для данного вида мест обитания проходит по отметкам 3 100–3 200 м для склонов восточной и северо-восточной экспозиции и 3 400 м для склонов северо-западной экспозиции. Варьирование уровней пригодности среды на со-

седних участках редко образует полночленный ряд, как, например, три восточных участка в окрестностях популяции с координатами 47.834E 41.252N, расположенной в нижней позиции высотной колонки (2 550 м н.у.м.). Это свидетельствует о том, что климатические особенности по склонам горных рек Мулларчай, Чехачай, Рагданчай и Вахчагчай не соответствуют оптимальным для обитания здесь *V. formosa*. Значительное число выявленных здесь локальных популяций – следствие высокой посещаемости и хорошей обследованности этого фрагмента ареала вида. Согласно построенной прогнозной модели, на Северном Кавказе более подходящие условия окружающей среды характеризуют фрагмент ареала вида, расположенный в полосе высокогорий между 41.877–42.130 с.ш. и 46.605 – 46.851 в.д., где значение ИПСО для участков с точками регистрации вида варьирует от 212 до 235, что соответствует высоко пригодным условиям обитания (Q4). Этот фрагмент ареала вида находится в границах Тляртинского государственного природного заказника, расположенного в верховьях реки Аварское Койсу (бассейн реки Джурмут) и охватывает северные склоны Главного Кавказского хребта и юго-западные отроги хребта Нукатль в Республике Дагестан.

Отдельно была проведена оценка неоднородности среды по значениям ИПСО, отражающим градиенты пригодности среды обитания на смежных участках местности, установлено положение границ с наиболее заметными перепадами значений ИПСО. На примере изученной выборки такие границы выявлены в направлении на юг от точек регистрации вида в верхней части высотной колонки, на участках, занимающих заметно более высокое положение (4 000–4 200 м н.у.м.). С другой стороны, при спуске в долину также наблюдается падение значений ИПСО, но происходит оно постепенно, в отличие от резкого перепада в верхней части горных поднятий.

Близкие значения ИГС встречаются на склонах разной экспозиции. Более контрастные условия характерны для верхней части склонов, с максимумом на высоте 3 470 м

в окрестностях популяции с координатами 47.845E 41.228N. Наиболее однородная среда обитания характерна для окрестностей локальной популяции с координатами 47.777E 41.254N, расположенной в средней части высотной колонки (2 780 м н.у.м.). Можно предположить, что в условиях низкой гетерогенности среды локальные популяции, обитающие в умеренно пригодных условиях, будут включать больше растений, чем в условиях высокой гетерогенности среды обитания. Каждая из сгенерированных в ходе компьютерного эксперимента прогнозных моделей базируется на сочетании трех базовых предикторов, дополненных другими значимыми переменными. Так, в самом подробном масштабе 1/120 градуса, годовая амплитуда температуры приземного слоя воздуха (bio07), как разница между максимальной температурой самого теплого месяца и минимальной температурой самого холодного месяца, занимает первую позицию в списке наиболее влиятельных переменных и вносит вклад 20,1 %. Следовательно, с учетом высокогорного характера экологической ниши данного вида, важнейшим фактором существования и воспроизводства локальных популяций *V. formosa* выступают относительно низкие летние температуры среды обитания. С другой стороны, в полученной модели крайне высоко также влияние средней температуры воздуха в мае (tmean05) – 19,8 %. Вероятно, именно в мае происходит переход среднесуточной температуры через отметку, определяющую начало вегетации растений данного вида в условиях высокогорий Северного Кавказа. Для проверки этой рабочей гипотезы следует разделить выборку точек регистрации на две – северо-кавказскую и анатолийско-иранскую. Если данная гипотеза справедлива, то анатолийско-иранская выборка локальных популяций как более южная должна продемонстрировать сдвиг данной закономерности на апрель, с участием средней температуры марта в качестве значимой переменной. Триаду ведущих предикторов замыкает количество атмосферных осадков в апреле (prec04, вклад в модель 15,0 %). По всей видимости, атмосферные осадки в апреле вносят определяющий вклад в накопление ве-

сенной влаги, необходимой для начала вегетации растений данного вида. Это предположение подтверждается высоким влиянием на построенную модель количества атмосферных осадков в мае (prec05, вклад в модель 9,5 %) – четвертого по значимости предиктора. Далее по убыванию значения следуют: максимальная температура воздуха в апреле (tmax04, вклад в модель 6,2 %) и минимальная температура воздуха в июле (tmin07, вклад в модель 6,2 %). Вероятно, максимальная температура воздуха в апреле стимулирует растения вавилонии прекрасной к началу вегетации и работает в паре со среднемесячной температурой воздуха в мае. В противоположность этому, минимальные температуры июля попадают на начало цветения растений и снижают как обилие цветения, так и активность опылителей. Замыкает список влиятельных предикторов с нижним пороговым значением 5,0 % минимальная температура воздуха в январе (tmin01). Можно предположить, что минимальные температуры воздуха в январе – самом холодном месяце года в Северном полушарии – вызывают обмерзание подземных органов зимующих растений и, ослабляя растения, могут приводить к их гибели. Комбинация из семи описанных выше предикторов определяет все основные особенности ареала вавилонии прекрасной, поскольку их суммарный вклад в прогнозную модель составил 81,8 %.

Прогнозные модели, построенные в других пространственных разрешениях, характеризуются перестановками в спектрах наиболее влиятельных предикторов, что обусловлено укрупнением учетных климатических и модельных участков, сопровождающимся нивелировкой специфики конкретных экологических условий. Так, пространственная модель с разрешением 1/24 градуса базируется на следующей комбинации наиболее влиятельных предикторов: bio07(25.3), prec04(23.9), tmin07(10.1), tmax01(6.6), bio17(6.0), prec05(5.6), tmean05(4.4). В данном пространственном разрешении за счет генерализации данных вклад годовой амплитуды температуры приземного слоя воздуха возрастает до 25,3 %, влияние количества атмосферных осадков в апреле повышается до 23,9 %, а вклад минимальной тем-

пературы воздуха в июле возрастает до 10,1 %, тогда как значение средней температуры воздуха в мае существенно снижается до 4,4 %. Параллельно с этим снижается роль осадков в мае, но возрастает значение максимальной температуры воздуха в январе ($t_{\max 01}$; 6,6 %) и количество атмосферных осадков в наиболее сухую четверть года ($bio17$; 6,0 %). Пространственная модель с разрешением 1/12 градуса характеризуется сходной комбинацией наиболее влиятельных предикторов: $prec04(20.5)$, $bio07(20.3)$, $t_{\text{mean}05}(11.0)$, $t_{\text{min}07}(8.8)$, $bio17(8.3)$, $bio02(6.4)$, $t_{\max 01}(5.1)$. При дальнейшей генерализации данных происходит снижение вклада годовой амплитуды температуры воздуха до 13,0 %, и впервые в данной серии моделей этот важный предиктор перемещается на третью позицию климатического спектра. Причина снижения значимости состоит в его конкуренции с предиктором $bio03$ (изотермичность), который в данном масштабе впервые входит в группу лидирующих факторов. Изотермичность представляет собой отношение суточной амплитуды температур ($bio02$) к годовой амплитуде температур ($bio07$), что определяет сопряженность предикторов $bio03$ и $bio07$. Значение количества атмосферных осадков в апреле здесь достигает максимального значения (22,2 %). По-прежнему важное значение имеет средняя температура воздуха в мае (12,7 %).

Заключение

Основу всех описанных выше климатических спектров составляют три важнейших предиктора (табл. 2). По минимальному значению суммы рангов лидерство поделили два из них: 1) количество атмосферных осадков в апреле ($prec04$; сумма баллов 7; итоговый ранг 1–2); 2) годовая амплитуда температуры приземного слоя воздуха ($bio03$; сумма баллов 7; итоговый ранг 1–2). Важно указать, что количество атмосферных осадков в апреле имеет первостепенное значение в моделях с малой и средней пространственной детализацией (1/6 и 1/12 градуса, соответственно), тогда как годовая амплитуда температуры воздуха выходит на первую позицию в моделях высокого и максимально высокого пространственного разрешения (1/24 и 1/120 градуса, соответственно). Средняя температура воздуха в мае заняла в общем зачете третье место (сумма баллов в четырех спектрах равна 16), с большим отставанием от лидеров. При этом данный предиктор занял вторую позицию в модели максимально высокого пространственного разрешения (1/120 градуса) и третью – в модели среднего пространственного разрешения (1/12 градуса), что подтверждает его высокую значимость в отдельных спектрах полуженной серии.

Таблица 2

Сравнительные характеристики важнейших предикторов

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$prec04$	22.2	20.5	23.9	15.0	1	1	2	3	7	1-2
$bio07$	13.0	20.3	25.3	20.1	3	2	1	1	7	1-2
$t_{\text{mean}05}$	12.7	11.0	4.4	19.8	4	3	7	2	16	3
$bio03$	14.4	out	out	out	2	out	out	out	-	-
$bio09$	9.6	out	out	out	5	out	out	out	-	-
$bio15$	5.6	out	out	out	6	out	out	out	-	-
$bio17$	4.6	8.3	6.0	out	7	5	5	out	-	-
$t_{\text{min}07}$	out	8.8	10.1	6.2	out	4	3	5-6	-	-
$bio02$	out	6.4	out	out	out	6	out	out	-	-
$t_{\max 01}$	out	5.1	6.6	out	out	7	4	out	-	-
$prec05$	out	out	5.6	9.5	out	out	6	4	-	-
$t_{\max 04}$	out	out	out	6.2	out	out	out	5-6	-	-
$t_{\text{min}01}$	out	out	out	5.0	out	out	out	7	-	-

В табл. 2: 1 – кодовое обозначение предиктора: *prec04* – количество атмосферных осадков в апреле, *bio03* – изотермичность, *bio07* – годовая амплитуда температуры воздуха; *tmean05* – средняя температура воздуха в мае, *bio09* – средняя температура самой теплой четверти года, *bio15* – сезонность осадков (коэффициент вариации), *bio17* – количество атмосферных осадков в самую сухую четверть года, *tmin07* – минимальная температура воздуха в июле, *bio02* – средняя суточная амплитуда температуры, *tmax01* – максимальная температура воздуха в январе, *prec05* – количество атмосферных осадков в мае, *tmax04* – максимальная температура воздуха в апреле, *tmin01* – минимальная температура воздуха в январе; 2 – индивидуальный вклад предиктора в прогнозную модель, основанную на климатических участках размерностью 1/6 градуса (низкая детализация); 3 – индивидуальный вклад предиктора в прогнозную модель, основанную на климатических участках размерностью 1/12 градуса (средняя детализация); 4 – индивидуальный вклад предиктора в прогнозную модель, основанную на климатических участках размерностью 1/24 градуса (высокая детализация); 5 – индивидуальный вклад предиктора в прогнозную модель, основанную на климатических участках размерностью 1/120 градуса (максимально доступная детализация); 6 – ранг предиктора в климатическом спектре модели, основанной на климатических участках размерностью 1/6 градуса; 7 – ранг предиктора в климатическом спектре модели, основанной на климатических участках размерностью 1/12 градуса; 8 – ранг предиктора в климатическом спектре модели, основанной на климатических участках размерностью 1/24 градуса; 9 – ранг предиктора в климатическом спектре модели, основанной на климатических участках размерностью 1/120 градуса; 10 – сумма рангов в четырех спектрах; 11 – итоговый ранг предиктора. Отсутствие предиктора в головной части спектра обозначено меткой *out*.

Список дополнительных предикторов включает 10 переменных, входящих в группу лидеров хотя бы в одном спектре (см. табл. 2). Среди них особое положение занимают две

переменные, которые встречаются в группе лидеров в трех из четырех сгенерированных моделей: 1) минимальная температура воздуха в июле (*tmin07*) и 2) количество атмосферных осадков в самую сухую четверть года (*bio17*). При этом минимальная температура воздуха в июле более значима для построения прогнозных моделей среднего и высокого разрешения, где она занимает 3–4 позиции. Количество атмосферных осадков в самую сухую четверть года конкурирует с количеством осадков в апреле, в полученных спектрах этот предиктор занимает 5 или 7 позиции. Значение максимальной температуры воздуха в январе (*tmax01*) проявляется в прогнозах средней и высокой детализации, где этот предиктор занимает 7 и 4 позицию в спектре, соответственно. Количество атмосферных осадков в мае (*prec05*) – существенный дополнительный предиктор в моделях высокого и максимально высокого пространственного разрешения, где он занимает 6 и 4 позицию, соответственно. Оставшиеся шесть предикторов входят в головную часть спектра в моделях только одного пространственного разрешения: изотермичность (*bio03*) занимает вторую (!) позицию в построении модели низкого разрешения (1/6 градуса), средняя температура наиболее сухой четверти года (*bio09*) – пятую позицию в модели низкого разрешения, сезонность количества атмосферных осадков (*bio15*; коэффициент вариации) – шестую позицию в модели низкого разрешения, суточная амплитуда температуры (*bio02*) – шестую позицию в модели среднего разрешения (1/12 градуса), максимальная температура воздуха в апреле (*tmax04*) – 5–6 позицию в модели максимально высокого пространственного разрешения (1/120 градуса), минимальная температура воздуха в январе (*tmin01*) – 7 позицию в модели максимально высокого пространственного разрешения.

Сравнение предикторов по их вкладу в прогнозную модель разного пространственного разрешения убедительно показывает необходимость построения полночленной серии моделей, которая будет включать весь спектр доступных пространственных разрешений, – от 1/6 до 1/120 градуса. Только та-

кой подход позволит исследователю получить наиболее содержательную информационную основу для корректной оценки вклада предикторов с учетом уровней генерализации пространственных климатических данных. Перспективным направлением дальнейших исследований можно считать дискретизацию прогнозных значений индекса пригодности среды обитания путем разделения малых климатических участков на еще более мелкие, например, с размерностью 1/360 градуса по долготе и широте. С другой стороны, теперь стало возможным любое укрупнение сравниваемых участков с шагом 1/120 градуса, например, очень актуальное разрешение 1/60 градуса, для прямого сравнения региональных моделей с общемировыми путем объединения четырех смежных участков и суммирования предсказанных значений. Полученные результаты и выводы дают основание предполагать эффективность построения прогнозных моделей для решения спорных вопросов, связанных с разработкой единой системы экологических групп видов для равнинных и горных территорий [24], и могут

быть использованы на разных структурных уровнях организации растительного покрова – глобальном, региональном, ландшафтном и ценоотическом [25], в том числе для прогнозного картографирования пространственно-временной динамики экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения [26]. Прогнозные модели низкого и среднего разрешения, отражающие общие тенденции в эволюции таксонов с широкими ареалами, можно рекомендовать для изучения процессов филогенетической иммобилизации и разработки мер по сохранению генофонда таксонов со сниженной экологической пластичностью [27], разработке схем эколого-географического районирования и оценке климатоэкологических ресурсов крупных регионов [28, 29]. Элементы предложенной выше методики, в частности индекс пригодности среды обитания (ИПСО), могут быть эффективно применены при разработке интегральных показателей рационального использования земель, в том числе лесного фонда и земель сельскохозяйственного назначения [30, 31].

Исследование выполнено в рамках государственного задания ЦСБС СО РАН по теме АААА-А17-117012610055-3 «Биологическое разнообразие криптогамных организмов (водоросли, грибы, лишайники) и сосудистых растений в геопространстве биотических и абиотических факторов, оценка их роли в водных и наземных экосистемах Северной Азии» (разработка методики) при частичной поддержке РФФИ (грант 19-04-00658). При подготовке публикации использованы материалы биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН УНУ «Гербарий высших сосудистых растений, лишайников и грибов (NS, NSK)», USU 440537.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамсон Н. И. Филогеография: итоги, проблемы, перспективы // Информационный вестник ВОГиС. – 2007. – Т. 11, № 2. – С. 307–331.
2. Абрамсон Н. И. Молекулярные маркеры, филогеография и поиск критерия разграничения видов // Труды Зоологического института РАН. Прил. № 1. – 2009. – Т. 313, № S1. – С. 185–198.
3. Муртазалиев Р. А., Мусаев А. М., Бурляева М. О., Гусейнова З. А., Раджабов Г. К., Александрова Т. Г., Коцера В. В. *Vavilovia formosa* и *Cicer minutum* (Fabaceae) в Дагестане // Ботанический журнал. – 2012. – Т. 97, № 7. – С. 961–966.
4. Красная книга Республики Дагестан. – Махачкала, 2009. – 552 с.
5. Красная книга Республики Дагестан. – Махачкала, 2020. – 800 с.
6. Vishnyakova M., Burlyaeva M., Akopian Ja., Murtazaliev R., Mikić A. Reviewing and updating the detected locations of beautiful vavilovia (*Vavilovia formosa*) on the Caucasus sensu stricto // Genetic Resources and Crop Evolution. – 2016. – Vol. 63, No. 7. – P. 1085–1102.
7. 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.
8. Камелин Р. В. Флора бассейна реки Варзоб (Гиссарский хребет, Таджикистан) и ее анализ. – Барнаул, 2021. – 612 с.
9. Akopian J., Ghukasyan A., Novakimyan Zh., Martirosyan L., Zaroyan G. Experience of Wild Perennial Pea *Vavilovia formosa* Cultivation in the Botanical Gardens of Armenia. – Yerevan, 2019. – 14 p.

10. Akopian J. A., Ghukasyan A. G., Gabrielyan I. G., Novakimyan Zh. H., Martirosyan L. Yu. High mountain perennial pea *Vavilovia formosa* (Steven) Fed. A review of its study in Armenia 2022 // *Vavilovia*. – 2022. – Vol. 5, No. 1. – P. 3–22.
11. Байков К. С., Кривенко Д. А., Муртазалиев Р. А., Мурашко В. В., Байкова Е. В. Пространственный мониторинг современной экологической ситуации в локалитетах *Vavilovia formosa* (Fabaceae) по данным прогнозного экологического моделирования // *Сибирский экологический журнал*. – 2021. – № 2. – С. 227–241.
12. GoogleMaps [Electronic resource]. – 2023. – Mode of access: <https://google.com> (дата обращения: 22.07.2023).
13. Phillips S.J., Dudík M., Schapire R.E., 2019. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://biodiversityinformatics.amnh.org/opensource/maxent>.
14. Baikov K., Turdiboev O., Baikova E. Predictive distribution for *Salvia aethiopis* (Lamiaceae) in Middle Asian Region based on climatic modelling // *BIO Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 38. – Article Number 00007.
15. 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. – P. 4302–4315.
16. 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.
17. Gaston K.J., Fuller R.A. The sizes of species geographic ranges // *Journal of Applied Ecology*. – 2009. – Vol. 46, No. 1. – P. 1–9.
18. Hutchinson G. E. Concluding remarks // *Cold Spring Harbor Symposium on quantitative biology*. – 1957. – Vol. 22. – P. 415–427.
19. Phillips S. J., Anderson R. P., Dudik M., Schapire R. E., Blair M. E. Opening the black box: An open-source release of Maxent // *Ecography*. – 2017. – Vol. 40, No. 7. – P. 887–893.
20. Daru B. H., Park D. S., Primack R. B., Willis C. G., Barrington D. S., et al. Widespread sampling biases in herbaria revealed from large-scale digitization // *New Phytologist*. – 2018. – Vol. 217, No. 2. – P. 939–955.
21. Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N.E. *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. – 478 p.
22. Fourcade Y., Besnard A.G., Secondi J. Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics // *Global Ecology Biogeography*. – 2018. – Vol. 27, No. 2. – С. 245–256.
23. Tuanmu M. N., Jetz W. A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modelling // *Glob. Ecology Biogeogr.* – 2015. – Vol. 24, No 11. – P. 1329–1339.
24. Королук А. Ю., Ямалов С. М. Экологические группы видов по отношению к увлажнению в дифференциации степей Западно-Сибирской равнины и Южного Урала // *Сибирский экологический журнал*. – 2015. – № 2. – С. 202–214.
25. Петропавловский Б. С., Варченко Л. И. Использование информационной статистики для изучения экологии растительности и динамических процессов растительного покрова Земли // *Сибирский экологический журнал*. – 2021. – № 3. – С. 263–273.
26. Чупина Д. А., Зольников И. Д., Смоленцева Е. Н. Прогнозное картографирование пространственно-временной динамики экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения в субаридных условиях // *Сибирский экологический журнал*. – 2020. – № 5. – С. 662–675.
27. Махров А. А. Снижение эволюционной пластичности в результате филогенетической иммобилизации и его экологическое значение // *Сибирский экологический журнал*. – 2019. – № 5. – С. 491–505.
28. Байков К. С., Байкова Е. В., Банаев Е. В. Эколого-географический анализ эндемичных сосудистых растений Сибири и проблема их сохранения *ex situ* // *Сибирский экологический журнал*. – 2019. – № 5. – С. 506–525.
29. Трофимова И. Е., Осипова О. П., Балыбина А. С. Подходы к оценке климатозоологических ресурсов территории Сибири // *Сибирский экологический журнал*. – 2019. – № 5. – С. 538–549.
30. Белоусов А. О., Богданов В. Л. Метод расчета интегральных показателей качества и рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в QGIS // *Вестник СГУГиТ*. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 160–172.

31. Дубровский А. В. Методические подходы к моделированию и прогнозированию рационального использования земельных ресурсов с применением геотехнологий // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 3. – С. 145–156.

Об авторах

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

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

Получено 14.08.2023

© К. С. Байков, Е. В. Байкова, 2023

Ecological ranking of distribution of *Vavilovia formosa* (Fabaceae) in the Republic of Dagestan (Northern Caucasus): new geosystem technologies

K. S. Baikov¹*, E. V. Baikova¹

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

* e-mail: kbaikov2018@mail.ru

Abstract. The article suggests the original method for ecological suitability evaluation of the habitat for local populations of *Vavilovia formosa* (Steven) Al.Fed. in the Republic of Dagestan (Northern Caucasus). Particular attention is paid to the development of methodological issues of studying the state of rare species local populations. The improvement of the methodology for constructing predictive ranges and the expert evaluation procedure of the obtained results is illustrated by the example of the eastern range fragment detailed analysis of *V. formosa* in the North Caucasus. The research has identified the limiting factors complexes that determine the patterns of local populations spatial distribution on slopes of different exposure, steepness and absolute height in models of different spatial resolution. For the first time, the translation of the initial probability values into a new habitat suitability index has been proposed and implemented. This index allows working with probability values in the form of natural numbers, which greatly facilitated their comparison. Evaluation of predictors by their contribution to predictive models of different spatial resolution convincingly shows the need to build a full-term series of models that will include the entire range of available spatial resolutions – from 1/6 to 1/120 degrees. Only such an approach will allow the researcher to obtain the most meaningful information base for a correct assessment of the contribution of predictors, taking into account the levels of spatial climate data generalization. A promising direction for further research can be considered discretization of predictive values of the habitat suitability index by dividing small climatic areas into even smaller ones, for example, with a dimension of 1/360 degrees in longitude and latitude.

Keywords: geocology, habitat suitability, local population, predictive modeling, *Vaviloviaformosa*, Republic of Dagestan, North Caucasus

REFERENCES

1. Abramson, N. I. (2007). Phylogeography: results, issues and perspectives. *Informatsionnyy vestnik VOGiS [Herald of Vavilov Society for Geneticists and Breeding Scientists]*, 11(2), 307–331 [in Russian].
2. Abramson, N. I. (2009). Molecular markers, phylogeography and search for the criteria for delimiting species. *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN. Prilozhenie № 1 [Proceedings of the Zoological Institute RAS. Supplement 1]*, 313(S1), 185–198 [in Russian].
3. Murtazaliev, R. A., Musaev, A. M., Burlyayeva, M. A., Guseinova, Z. A., Radzhabov, G. K., Aleksandrova, T. G., & Kotseruba, V. V. (2012). *Vavilovia formosa* and *Cicer minutum* (Fabaceae) in Dagestan. *Botanicheskii Zhurnal [Botanical Journal]*, 97(7), 961–966 [in Russian].
4. *Krasnaya kniga Respubliki Dagestan [The Red Data Book of the Dagestan Republic]*. (2009). Makhachkala, 552 p. [in Russian]. [Krasnaya kniga Respubliki Dagestan
5. *Krasnaya kniga Respubliki Dagestan [The Red Data Book of the Dagestan Republic]*. (2020). Makhachkala, 800 p. [in Russian].

6. Vishnyakova, M., Burlyaeva, M., Akopian, Ja., Murtazaliev, R., & Mikić, A. (2016). Reviewing and updating the detected locations of beautiful vavilovia (*Vavilovia formosa*) on the Caucasus sensu stricto. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 63(7), 1085–1102.
7. Lissovsky, A. A., & Dudov, S. V. (2021). Species-distribution modeling: advantages and limitations of its application. 2. MaxEnt. *Zhurnal obshchey biologii [Biology Bulletin Reviews]*, 11(3), 265–275 [in Russian].
8. Kamelin, R. V. (2021). *Flora basseina reki Varsob (Gissarskiy khrebet, Tadzhikistan) i ee analisis [Flora of the Varzob River basin (Gissar Range, Tajikistan) and its analysis]*. Barnaul, 612 p. [in Russian].
9. Akopian, J., Ghukasyan, A., Hovakimyan, Zh., Martirosyan, L., & Zaroyan, G. (2019). *Experience of Wild Perennial Pea Vavilovia formosa Cultivation in the Botanical Gardens of Armenia*. Yerevan, 14 p.
10. Akopian, J. A., Ghukasyan, A. G., Gabrielyan, I. G., Hovakimyan, Zh. H., & Martirosyan, L. Yu. (2022). High mountain perennial pea *Vavilovia formosa* (Steven) Fed. A review of its study in Armenia. *Vavilovia*, 5(1), 3–22.
11. Baikov, K. S., Krivenko, D. A., Murtazaliev, R. A., Murashko, V. V., & Baikova, E. V. (2021). Spatial monitoring of the modern environmental situation in localities of *Vavilovia formosa* (Fabaceae) based on predictive climatic modeling. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 14(2), 182–192 [in Russian].
12. GoogleMaps. (n. d). Retrived from <https://google.com> (accessed July 22, 2023).
13. Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2019). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Retrieved from <http://biodiversityinformatics.amnh.org/opensource/maxent>.
14. Baikov, K., Turdiboev, O., & Baikova, E. (2021). Predictive distribution for *Salvia aethiopsis* (Lamiaceae) in Middle Asian Region based on climatic modelling. *BIO Web of Conferences*, 38, Article No. 00007.
15. Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
16. Lissovsky, A. A., Dudov, S. V., & Obolenskaya, E. V. (2021). Species-distribution modeling: advantages and limitations of its application. 1. General approaches. *Zhurnal obshchey biologii [Biology Bulletin Review]*, 11(3), 254–264 [in Russian].
17. Gaston, K. J., & Fuller, R. A. (2009). The sizes of species geographic ranges. *Journal of Applied Ecology*, 46(1), 1–9.
18. Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposium on quantitative biology*, 22, 415–427.
19. Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudik, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893.
20. Daru, B. H., Park, D. S., Primack, R. B., Willis C. G., & Barrington, D. S. (2018). Widespread sampling biases in herbaria revealed from large-scale digitization. *New Phytologist*, 217(2), 939–955.
21. Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. Cambridge: Cambridge University Press, 478 p.
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. *Global Ecology Biogeography*, 27(2), 245–256.
23. Tuanmu, M. N., & Jetz, W. (2015). A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modelling. *Global Ecology Biogeography*, 24(11), 1329–1339.
24. Korolyuk, A. Yu., & Yamalov, S. M. (2015). Differentiation of Ecological Groups of Species According to their Reaction to Moisture in Differentiation of Steppes of the West Siberian Plain and South Urals. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 2, 162–172 [in Russian].
25. Petropavlovsky, B. S., & Varchenko, L. I. (2021). Using information statistics to study the ecology of vegetation and dynamic processes of the earth's vegetation cover. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 3, 209–217 [in Russian].
26. Chupina, D. A., Zolnikov, I. D., & Smolentseva, E. N. (2020). Predictive mapping of spatiotemporal dynamics in subarid ecosystems amid multidirectional climatic wetting trends. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 556–566 [in Russian].
27. Makhrov, A. A. (2019). Decreased evolutionary plasticity as a result of phylogenetic immobilization and its ecological significance. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 405–417 [in Russian].

28. Baikov, K. S., Baikova, E. V., & Banaev, E. V. (2019). Ecological and geographical analysis of endemic vascular plants in Siberia and problems of their conservation ex situ. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 418–433 [in Russian].

29. Trofimova, I. E., Osipova, O. P., & Balybina, A. S. (2019). Approaches to evaluating climate and ecological resources of Siberia. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]*, 5, 444–452 [in Russian].

30. Belousov, A. O., & Bogdanov, V. L. (2022). Method of calculation of integral indicators of quality and rational use of agricultural land in QGIS. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(5), 160–172. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-160-172 [in Russian].

31. Dubrovsky, A. V. (2022). Methodological approaches to modeling and forecasting of rational use of land resources using geotechnologies. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(3), 145–156. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-145-156 [in Russian].

Author details

Konstantin S. Baikov – D. Sc., Leading Researcher.

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

Received 14.08.2023

© K. S. Baikov, E. V. Baikova, 2023