

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО АРЕАЛА
РЕЛИКТОВОГО ВИДА (*CARAGANA JUBATA* (PALL.) POIR.)
НА ОСНОВЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

А.Г. Чурюлина, М.В. Бочарников

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, agchurylina@gmail.com

Выявлен потенциальный ареал редкого реликтового вида — караганы гривастой (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.). Составлены прогнозные карты распространения исследуемого вида на основе биоклиматических переменных BioClim для всего ареала и отдельно для территории Станового нагорья (Республика Бурятия, Россия), где исследуемый вид находит ценотический оптимум. При моделировании в среде Maxent выявлено, что наибольшее влияние на пространственное распределение изучаемого вида оказывает комплекс факторов, связанных с месячными и годовыми амплитудами температуры и осадков, что характеризует континентальность климата. Статистический анализ полученных результатов показал более высокую точность модели для всего ареала караганы гривастой (показатель «площадь под кривой» (AUC) для тренировочных данных — 0,924), нежели для части ареала, представленной территорией Станового нагорья (AUC — 0,815).

Ключевые слова: моделирование ареала, климатические факторы, Становое нагорье, реликтовый вид, BioClim, Maxent.

**MODELING OF THE POTENTIAL DISTRIBUTION OF THE RELICT
PLANT SPECIES (*CARAGANA JUBATA* (PALL.) POIR.) BASED
ON CLIMATE DATA**

A.G. Churiulina, M.V. Bocharnikov

Department of Biogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

The potential range of a rare relict species is revealed (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.). Forecast maps of distribution of the species under study were compiled on the basis of bioclimatic variables BioClim for the entire area of relict species distribution and separately for the territory of the Stanovoy Highlands (the Republic of Buryatia, Russia), where the species under study is located in a coenotic optimum. When modeling in the Maxent environment, it was found that the greatest influence on the spatial distribution of the studied species is exerted by a complex of factors associated with monthly and annual temperature and precipitation amplitudes, which characterize the continentality of the climate. Statistical analysis of the results showed a higher accuracy of the model for the entire geographic distribution (“Area Under the Curve” (AUC) — 0,924) than for the part of the area represented by the territory of the Stanovoy Highlands (AUC — 0,815).

Keywords: distribution modeling, climatic factors, Stanovoy Highlands, relict plant species, BioClim, Maxent.

Введение

Достоверные знания о географическом распространении видов растений крайне важны для эффективного решения практических задач мониторинга и сохранения биоразнообразия, особенно в случае редких видов растений, представляющих интерес для охраны. История формирования ареала вида лежит в основе

проблемы выявления закономерностей в формировании географического распространения растений. Понимание данных закономерностей предоставляет возможности оценки перспектив дальнейшего существования видов и характера их ареалов под влиянием различных факторов. С появлением новых методов и технологий можно моделировать динамику ареалов видов на основе связей с климатическими параметрами, геосистемными характеристиками и структурой основных местообитаний [10, 12]. Это связано с тем, что каждый вид имеет уникальную экологическую нишу. Изучение эколого-климатической и географической дивергенции может внести значительный вклад в понимание генезиса вида и характера его распространения [4].

Современные исследования [6, 7, 14], направленные на моделирование потенциальных ареалов видов растений и животных, все чаще основаны на применении метода максимальной энтропии, который реализуется в программе Maxent. Данный метод компьютерного моделирования позволяет строить вероятностный ареал исследуемого вида в условиях неполноты данных. Например, в случае моделирования вероятностного ареала редкого вида растения недостаточность информации о присутствии вида на той или иной территории не будет служить ограничивающим фактором. В результате моделирования становится возможной оценка связей одного или нескольких видов с различными факторами среды, как непрерывными (например, биоклиматические данные), так и категориальными (например, растительность исследуемой территории). Результатом статистического анализа программы являются выходные таблицы, несущие информацию о степени вклада различных переменных и о достоверности полученной модели в целом.

Изучение и анализ естественных ареалов видов растений в настоящее время в российской литературе освещены недостаточно полно — больше внимания уделяется ареалам видов животных [1, 9]. В связи с этим целью исследования является построение потенциального ареала редкого реликтового вида растения (*Caragana jubata* (Pall.) Poir.) на глобальном (для всего ареала вида) и региональном (территория Станового нагорья) уровнях.

Материалы и методы

Объектом исследования служит редкий реликтовый вид — карагана гривастая (*Caragana jubata* (Pall.) Poir. (Fabaceae)). Это листопадный кустарник высотой 0,3—2 м, произрастающий в высокогорьях и горнотаежном поясе [8]. Исследуемый вид имеет общеазиатский тип ареала и является реликтом третичного периода в горах Восточной Сибири [2, 3]. Вид внесен в Красную книгу следующих восьми субъектов Российской Федерации: республики Бурятия, Алтай, Саха (Якутия); Магаданская и Иркутская области; Хабаровский, Красноярский и Забайкальский край. Изолированность популяций и их низкая численность, а также экзогенные геоморфологические процессы, в том числе антропогенные (вырубка на лекарственные нужды, выпас скота), создают угрозу распространению караганы гривастой.

Для выявления потенциального ареала модельного вида применялся метод компьютерного моделирования, реализованный в программе Maxent 3.4.0.

Используя информацию о параметрах среды в известных местонахождениях моделируемого вида, программа определяет вероятность его присутствия на остальной территории посредством нахождения оптимального распределения вероятностей (максимальная энтропия) совпадения параметров среды [13]. В качестве входных переменных использовалась оригинальная база данных, содержащая информацию о 475 местонахождениях вида. Источниками информации для составления перечня с точками находок вида являлись гербарные коллекции главных гербариев страны (MWG, MW, LE, MHA, NS, NSK, TK), публикации российских и иностранных ученых, а также онлайн-ресурсы, в том числе Глобальный информационный фонд по биоразнообразию (GBIF). Для моделирования потенциального распространения вида на территории Станового нагорья отобрано 56 местонахождений *Caragana jubata*, которые охватывают различные типы пояности занимаемых видом местообитаний, а соответственно и различные климатические ниши.

В качестве источника информации о параметрах среды, используемых при построении модели вероятностного ареала караганы гривастой, применялись данные WorldClim [11], содержащие информацию о 19 биоклиматических переменных (BioClim). Для моделирования на глобальном уровне были подготовлены слои для каждого биоклиматического параметра, охватывающие весь ареал вида. Такие же слои биоклиматических параметров были подготовлены при моделировании распространения вида отдельно для территории Станового нагорья.

В результате моделирования составлены прогнозные карты распространения исследуемого вида на основе биоклиматических переменных для всего ареала и отдельно для территории Станового нагорья. Выходных форматов значений модели три: исходный, кумулятивный и логистический. Все они монотонно связаны, но разным образом масштабированы и имеют разную интерпретацию. Логистический является выходным форматом по умолчанию, его интерпретация самая удобная: он дает оценку вероятности находок в интервале от 0 до 1. Таким образом, получаем карту, отображающую вероятность нахождения вида (цветной градиент от синего до красного на рис. 1 и 4).

При статистическом анализе точность полученных моделей проверялась случайной выборкой. Программе было задано отобрать 25 % находок и отложить их в сторону для тестирования. Случайными тестовыми данными (random test percentage) являлись 119 и 14 точек местонахождений вида для всего ареала и части ареала (представленной Становым нагорьем) соответственно.

Результатом моделирования являются также таблицы, содержащие информацию о вкладе каждого из анализируемых факторов (percent contribution) и их важности при пермутации (permutation importance). Первый показатель определяется эвристически и зависит от конкретного пути, по которому шел код Maxent, чтобы достичь оптимального решения. Второй показатель зависит не от пути, который был пройден, а от окончательной модели.

Результаты и их обсуждение

Модель вероятностного распространения Caragana jubata на всем ареале вида

Анализ распространения реликтового вида *Caragana jubata* на глобальном уровне показал, что существует несколько основных районов с пригодными условиями для произрастания вида, и полученная модель подтверждает дизъюнктивный характер его ареала [2]. Географическое сосредоточение вида прослеживается во всех горных районах континентальной части Евразии (Гималаи, Тибет, Тянь-Шань, Алтай, Саяны, Становое нагорье), а также охватывает Колымское нагорье и Срединный хребет на побережье Охотского моря. Рассчитанная модель потенциального (вероятностного) ареала *Caragana jubata* представлена на рис. 1. Из полученных данных видно, что география и разнообразие местообитаний для модельного вида изучены не везде достаточно полно, что может быть связано с труднодоступностью мест произрастания реликтового вида и отсутствием информации о местах его находок. Обнаружены новые территории с подходящими условиями для произрастания караганы гривастой и вероятностью находок более 0,5. Это

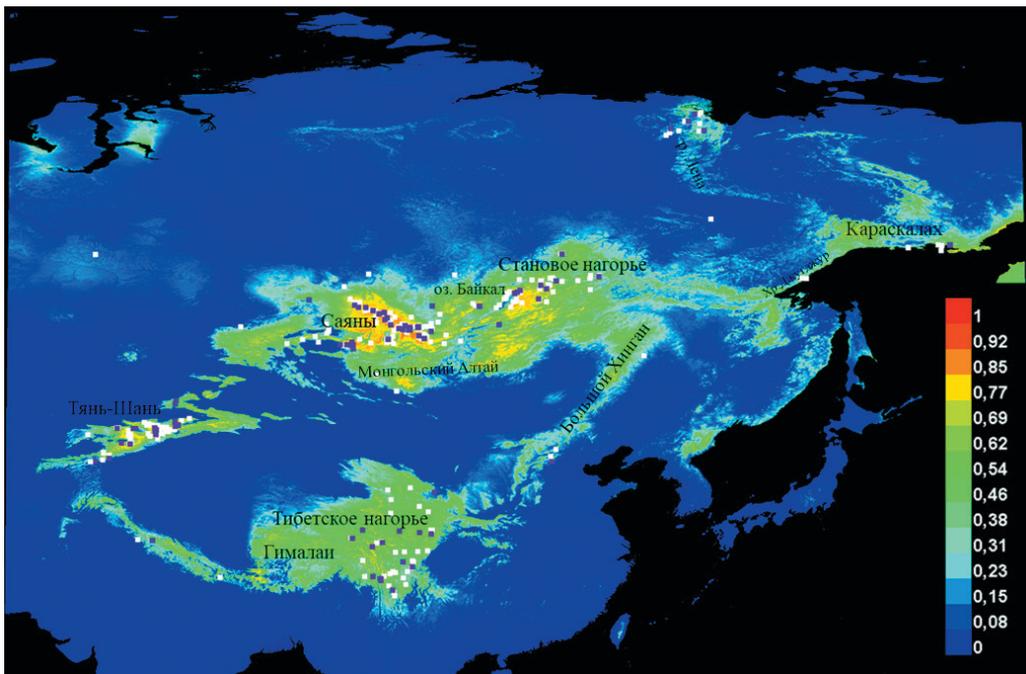


Рис. 1. Модель вероятностного распространения *Caragana jubata* на всем ареале вида на основе данных WorldClim.

Красный цвет (0,85—1) — участки с высокой вероятностью подходящих условий для произрастания вида; зеленый и желтый (0,38—0,85) — условия, сходные с современным распространением вида; синий (0—0,38) — условия маловероятного обнаружения вида. Белыми значками показаны тренировочные точки местонахождений вида (75 %), фиолетовыми — тестовые данные (25 %).

северо-восточная часть Тибетского нагорья, территория вулканического горного хребта на северо-востоке Китая и на востоке Монголии Большой Хинган, горная система Монгольский Алтай, а также хребет Джугджур близ Охотского моря.

Статистический анализ результатов показал высокую точность модели. Несмотря на достаточный разброс и имеющиеся скопления точек местонахождений в определенных районах ввиду особенностей типа ареала исследуемого вида, данные по тестовым локациям хорошо совпадают с предсказанной динамикой, рассчитанной для тестовых данных, полученных из распределения Maxent (рис. 2 а). Высокий показатель «площадь под кривой» (AUC) для тренировочных данных составляет 0,924, что подтверждает точность модели вероятностного ареала. Для тестовых данных значение AUC также велико — 0,915. Из рисунка видно, что кривые тестовых и тренировочных показателей расположены далеко от прямой центральной линии, которая показывает надежность прогноза модели на случайном уровне, что свидетельствует о высокой ожидаемой способности полученной модели (рис. 2 б). Это связано с тем, что при анализе использовалось достаточно большое число точек местообитаний вида.

При моделировании в среде Maxent выявлено, что наибольшее влияние на пространственное распределение изучаемого вида оказывает комплекс факторов, связанных с месячными и годовыми амплитудами температуры воздуха и количества осадков, что характеризует континентальность климата. В целом нельзя выделить какой-либо один фактор, который вносил бы наибольший вклад в итоговую модель. Значения более 10 % имеют только три переменные (рис. 3):

1) Bio15 — сезонность осадков, коэффициент вариации [11]; при коэффициенте вариации в диапазоне от 80 до 120 вероятность нахождения вида более 50 %;

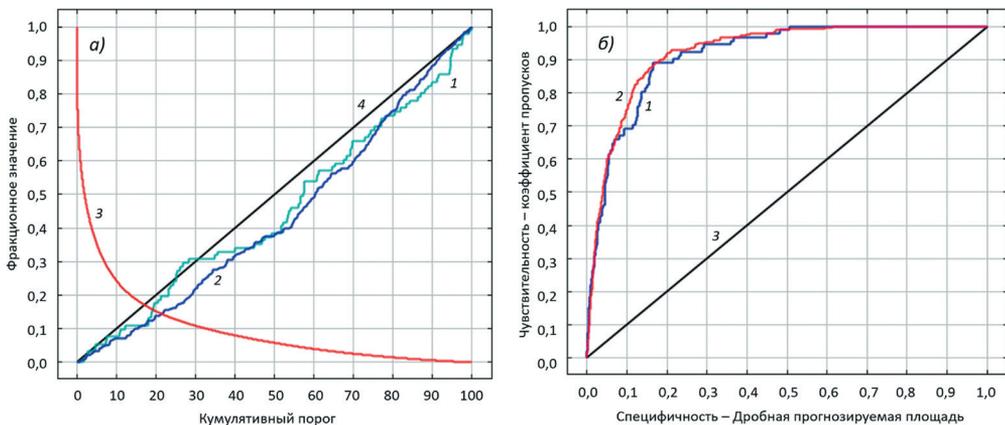


Рис. 2. Статистический анализ точности полученной модели вероятностного распространения *Caragana jubata*.

- а) 1 — тестовые данные; 2 — тренировочные данные;
 3 — фракция исходных данных, которые были предсказаны; 4 — предсказанная эмиссия;
 б) 1 — тестовые данные; 2 — тренировочные данные; 3 — случайное предсказание.

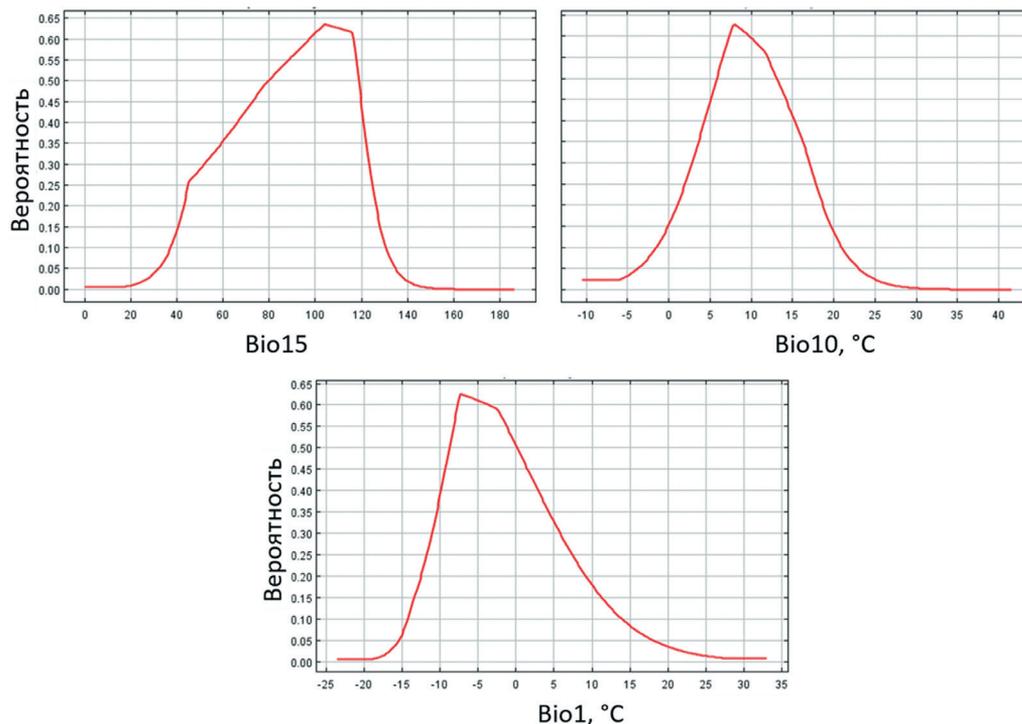


Рис. 3. Кривые зависимости модели вероятностного распространения *Caragana jubata* от биоклиматических параметров (Bio1, Bio10, Bio15).

2) Bio10 — средняя температура воздуха наиболее теплого квартала [11]; на кривой отклика выделяется пик наибольшей вероятности нахождения вида в диапазоне 7—8 °C;

3) Bio1 — среднегодовая температура воздуха [11]; вероятность нахождения вида больше при небольших отрицательных значениях переменной (от -7 до 0 °C).

Анализ статистических данных указывает на то, что характер географического распространения исследуемого вида, имеющего общеазиатский тип ареала, преимущественно связан с градиентом континентальности — океаничности климата. На этот же факт указывают другие исследования ученых [5, 6], посвященные изучению динамики и структуры популяций видов со схожими типами ареалов (восточно-азиатские, общеазиатские).

Совокупность факторов, характеризующих температурный режим, также играют одну из ключевых ролей в формировании ареала караганы гривастой, произрастание которой приурочено к холодным местообитаниям высокогорий и лесного пояса [8].

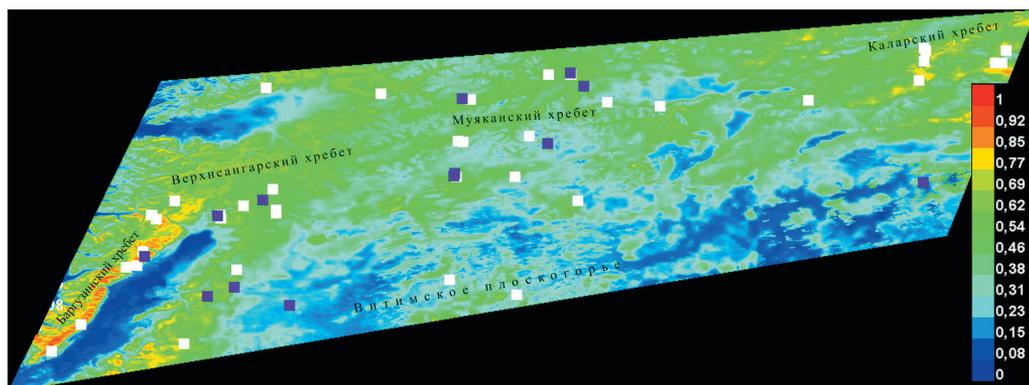


Рис. 4. Модель вероятностного распространения *Caragana jubata* на территории Станового нагорья на основе данных WorldClim.

Условные обозначения см. рис. 1.

Модель вероятностного распространения *Caragana jubata* на территории Станового нагорья

Полученная для территории Станового нагорья модель потенциального (вероятностного) ареала *Caragana jubata* представлена на рис. 4.

Результат моделирования пространственного распространения караганы гривастой можно считать удовлетворительным. Однако показатели «площадь под кривой» (AUCs) для обучающего и тестового наборов равны 0,815 и 0,668, соответственно. Данный результат свидетельствует об относительно небольшой точности модели вероятностного ареала по сравнению с проведенным моделированием для всего ареала вида, результаты которого освещены выше.

На прогнозной карте отмечается повышенная вероятность нахождения вида в высокогорьях восточной части Баргузинского хребта. Потенциальным районом распространения караганы гривастой с вероятностью нахождения вида более 70 % является также восточный склон Каларского хребта, меньшая вероятность характерна для Верхнеангарского и Муяканского хребтов. В вышеназванных районах наблюдается наибольшее число местонахождений вида, тогда как низкогорные области Витимского плоскогорья представлены изолированными местонахождениями.

В табл. 1 представлены параметры полученной модели. Из 19 биоклиматических переменных только четыре имеют показатели вклада более 10 % по тесту «permutation importance».

Наиболее тесные отношения с произрастанием вида имеет переменная вариации количества осадков наиболее влажного квартала (Bio16), с возрастанием значений которой до 230 мм в год (что характерно для высоких широт умеренного пояса) повышается вероятность обнаружения караганы гривастой (рис. 5). Дальнейшее же увеличение количества осадков ведет к уменьшению вероятности произрастания исследуемого вида, являющегося ксеропсихрофитом и способного переносить большую сухость климата и крайне суровые температурные условия [8].

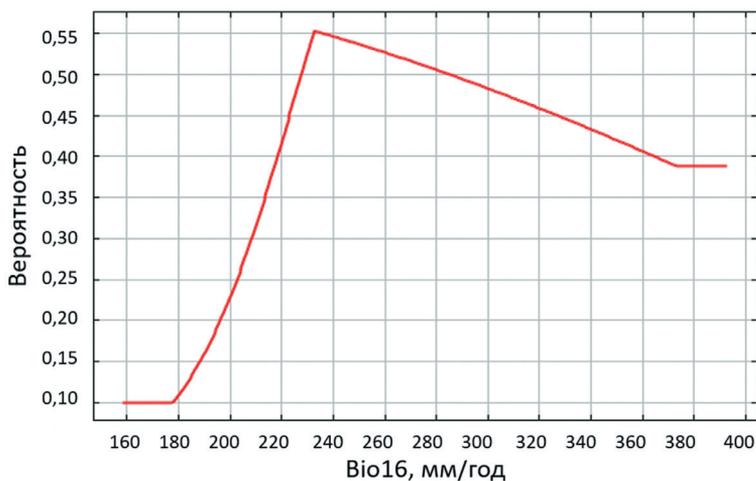


Рис. 5. Влияние переменной Bio16 «осадки наиболее влажного квартала» на вероятность нахождения *Caragana jubata* на территории Станового нагорья.

Таблица 1

Вклад (%) по двум показателям наиболее значимых переменных BioClim в модель потенциального распространения *Caragana jubata* на территории Станового нагорья

Переменная	Вклад, %	Важность при пермутации, %
Bio16 (осадки наиболее влажного квартала)	15,9	35,9
Bio7 (среднегодовая амплитуда колебания температуры)	26,2	13,2
Bio9 (средняя температура наиболее сухого квартала)	6,6	10,9
Bio13 (осадки наиболее влажного периода)	0,4	10,9

Заключение

Статистический анализ полученных результатов показал более высокую точность модели для всего ареала караганы гривастой (показатель «площадь под кривой» (AUC) для тренировочных данных — 0,924), нежели для части ареала, представленным территорией Станового нагорья (AUC — 0,815). Для мелкомасштабного моделирования потенциальных ареалов видов растений можно рекомендовать использовать данные BioClim, а для моделирования на региональном уровне использовать в том числе дополнительные источники (карты растительности, рельефа и др.) с целью повышения качества получаемой модели. Оптимальным вариантом для моделирования в крупном масштабе могут служить атласы карт, содержащие различные тематические карты исследуемой территории.

Влияние вклада различных биоклиматических компонентов в пространственное распределение изучаемых видов в будущем будет изменяться. Таким образом, дальнейшие исследования в данном направлении позволят более полно оценить влияние факторов (климатических, топографических, биотических и др.),

определяющих характер распределения популяций внутри естественного ареала того или иного вида, а также ареала в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 17—77—10142) по проекту «Изучение ботанического разнообразия и структурно-динамических свойств растительного покрова Станового нагорья».

Список литературы

1. Ананьева Н.Б., Гольнский Е.А. Анализ распространения горной кольцехвостой туркестанской агамы *Paralauadokia lehmanni* (Nikolsky, 1896): Использование программы Максент // Труды ЗИН РАН. 2013. № 4. С. 426—437.
2. Комаров В. Л. Введение к флорам Китая и Монголии. Вып. 2. Монография рода *Saragana* // Труды Санкт-Петербургского ботанического сада. 1909. Т. 29. № 2. С. 159—319.
3. Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 265 с.
4. Олонова М.В., Высоких Т.С., Мезина Н.С. Структура эколого-климатических ниш *Poa palustris* L. и *P. nemoralis* L. (Poaceae) на территории Азиатской России // Сибирский экологический журнал. 2018. № 6. С. 712—723.
5. Санданов Д.В. Оценка состояния популяций восточноазиатских видов растений в различных частях ареала // Растительный мир Азиатской России. 2010. № 2 (6). С. 80—87.
6. Санданов Д.В., Найданов Б.Б. Пространственное моделирование ареалов восточно-азиатских видов растений: современное состояние и динамика под влиянием климатических изменений // Растительный мир Азиатской России. 2015. № 3 (19). С. 30—35.
7. Солодянкина С.В., Истомина Е.А., Сороковой А.А., Четиногова В.В. Моделирование потенциального ареала ветреницы байкальской (*Anemone baicalensis*, Ranunculaceae) с использованием данных тематических карт // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 92—99.
8. Флора Сибири. Т. 9. Fabaceae (Leguminosae) / Сост. А.В. Положий, С.Н. Выдрина, В.И. Курбатский, О.Д. Никифорова. В 14 томах. Новосибирск: Сибирская издательская фирма ВО Наука, 1994. 280 с.
9. Щепина Н.А., Борисова Н.Г., Старков А.И. Ареал монгольской жабы в Байкальском регионе: настоящее и прошлое // Вестник Бурят. гос. ун-та. 2013. № 4. С. 147—149.
10. Douma J.C., Witte J.-Ph.M., Aerts R., Bartholomeus R.P., Ordoñez J.C., Venterink H.O., Wassen M.J., Van Bodegom P.M. Towards a functional basis for predicting vegetation patterns; incorporating plant traits in habitat distribution models // Ecography. 2012. V. 35. P. 294—305.
11. Global Climate Data [Электронный ресурс]. <http://worldclim.org/> (дата обращения 10.10.2018).
12. Guisan A., Zimmermann N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // Ecol. Model. 2000. V. 135. P. 147—186.
13. Phillips S. J., Dudík M., Schapire R. E. A maximum entropy approach to species distribution modeling // Proc. 21st Intern. Conf. on Machine Learning. New York: ACM Press, 2004. P. 655—662.
14. Qin A., Liu B., Guo Q., Bussmann R.W., Maa F., Jian Z., Xu G., Pei Sh. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China // Global Ecology and Conservation. 2017, 10. P. 139—146.