

**Исследование эколого-климатической ниши охраняемого вида
Erythronium sibiricum (Fisch. et Mey.) Kryl.**

**Investigation of the ecological and climatic niche of the protected species
Erythronium sibiricum (Fisch. et Mey.) Kryl.**

Левченко Л. С., Олонова М. В.

Levchenko L. S., Olonova M. V.

Томский государственный университет, г. Томск, Россия. E-mail: larlev4encko@yandex.ru, olonova@list.ru
Tomsk State University, Tomsk, Russia

Реферат. Кандык сибирский (*Erythronium sibiricum* (Fisch. et Mey.) Kryl.) – реликтовое растение, внесенное в красные книги РФ и областей, где он произрастает. Кандык сибирский распространен в Южной Сибири, Китае и Монголии. Данный вид имеет множество полезных качеств, например, его применяют в декоративных целях, для интродукции, в народной медицине и для получения мёда. Цель работы заключена в выявлении эколого-климатической ниши вида и построении на её основе модели пригодных местообитаний в условиях современного климата. В качестве инструментов для анализа и моделирования избраны метод MaxEnt 3.4.4 и BIOCLIM, реализованные в статистической среде программирования R (CRAN). Для визуализации и сведения полученных ранее слоёв удобной является программа ArcGIS 10.8. По итогу проделанной работы стало очевидно, что современное распространение вида в целом соответствует полученной модели распределения благоприятных условий для произрастания вида, а сокращение численности растения вызвано другими причинами.

Ключевые слова. Ареал, эколого-климатическая ниша, BIOCLIM, MaxEnt, R-программирование.

Summary. The Siberian kandyk (*Erythronium sibiricum* (Fisch. et Mey.) Kryl.) is listed in the Red Books of the Russian Federation and in the regions where it grows. The Siberian kandyk is widespread in Southern Siberia and Mongolia. This species has many useful qualities, for example, it is used for decorative purposes, for introduction, in folk medicine and for obtaining honey. The purpose of the work is to identify the ecological and climatic niche of the species and build on its basis a model of suitable habitats in the conditions of modern climate. The MaxEnt 3.4.4 and BIOCLIM methods implemented in the statistical programming environment R (CRAN) were chosen as tools for analysis and modeling. For visualization and information of previously obtained layers, the ArcGIS 10.8 program is convenient. As a result of the work done, it became obvious that the current distribution of the species as a whole corresponds to the obtained model of distribution of favorable conditions for the growth of the species, and the reduction in the number of plants is caused by other reasons.

Key words. Area, BIOCLIM, ecologo-climatic niche, MaxEnt, R-programming.

Введение. Кандык сибирский был описан Ф. Б. Фишером и К. А. Мейером 1841 г. и изначально его классифицировали как сибирскую разновидность кандыка европейского *Erythronium dens-canis* var. *sibiricum* Fisch. et C. A. Mey. Позднее, во «Флоре Западной Сибири», П. Н. Крылов (1929) обозначил эту разновидность кандыка как отдельный вид.

Вид имеет ограниченное распространение и, будучи высоко декоративным растением, подвергается сильному антропогенному воздействию. Помимо массового истребления на букеты, его съедобные луковицы раньше в больших количествах заготавливались населением некоторых регионов Южной Сибири в пищу и в медицинских целях (Ачимова, 2012).

В Российской Федерации он отмечен в Алтайском и Красноярском краях (Степанов, 2012), в Томской, Новосибирской и Кемеровской областях; в Республиках Алтай, Хакасия, Тыва. За пределами Российской Федерации встречается в Республике Казахстан, на севере Монголии и Китайской Народной Республики (Куваев, 2008), не выходя за пределы Алтайской горной страны. Произрастает

в лиственных лесах, на лесных полянах и в разреженных лиственничниках, в черневой тайге, при этом поднимается в горы 2400–2800 м. над ур. м. Растение довольно светолюбивое, холодостойкое, предпочитает влажные не задернованные почвы (Лучник, 1951), с умеренным содержанием элементов минерального питания (Красноборов, 2012). Разнообразие местообитаний в пределах небольших границ своего ареала указывает, что вид хорошо приспособлен к различным экологическим условиям.

Erythronium sibiricum внесен в Красную книгу Российской Федерации (2008) с 2 (V) категорией (сокращающиеся в численности и/или распространении). В Красных книгах и Томской области (2002, 2013) Алтайского края (2016) и Кемеровской области (2021) растению присвоена категория 3(R) – редкий вид, относительно благополучный, который подлежит государственной охране. Включен в сводку «Редкие и исчезающие растения Сибири» (Амельченко и др., 1980). Охраняется на территории памятников природы «Черневые леса Салаира» в Тогучинском, «Албанские ельники» и «Петеневские ельники» в Маслянинском, «Бердские скалы» и «Каменистая степь у села Новососедово» в Искитимском районах (Красников, 2018). Так же охраняется в заповедниках Алтайский, Катунский, Кузнецкий Алатау, Саяно-Шушенский и Хакасский, в Кемеровском лесном заказнике и на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) Томской области, где организован контроль над состоянием его популяций (Куваев, 2008). В Казахстане охраняется в Маркакольском и Западно-Алтайском заповедниках (Красников, 2018). Н. Н. Лащинский (2007) отмечает, что на Салаире *E. sibiricum* является фоновым видом подпоояса черневых лесов и доминантом синузии ранневесенних эфемероидов, хорошо размножается семенным и вегетативным путем, однако, учитывая его федеральный статус, для его сохранения оправдана организация охраняемых эталонных местообитаний вида. В Алтайском заповеднике это также обычный вид и встречается во всех флористических районах заповедника (Красноборов, 2012). Тем не менее, локальное распространение вида существенно увеличивает угрозу полного уничтожения этого вида (Куприянов, 2021).

Erythronium sibiricum введён в культуру и представляет особую ценность как декоративное растение, зацветающее сразу после схода снега. Он перспективен для создания альпинариев, ландшафтных садов, для оформления клумб и газонов (Зубкус, 1956). Выращиванием этого вида занимаются также пчеловоды с целью получения самых ранних сортов меда. В настоящее время известно немало сортов кандыка сибирского, различающихся периодом цветения и декоративными особенностями (Свиридонов, 1978).

Целью данного исследования было определение эколого-климатической ниши и построение модели территорий, пригодных для обитания *E. sibiricum*.

Материалы и методы. Эколого-климатическая ниша, сформировавшаяся в результате адаптаций вида к разным условиям среды, является такой же неотъемлемой его чертой, как морфологическая и генетическая характеристика.

Реальным отражением эколого-климатической ниши является модель территории, полученная с помощью переменных, определяющих нишу, однако, поскольку этих переменных может быть сколько угодно много, полное представление мы не можем получить никогда, но, вводя наиболее важные показатели, можем приблизиться к желаемому результату.

Основой для выявления местонахождений *E. sibiricum* послужили материалы фондовых коллекций гербария им. П. Н. Крылова Томского государственного университета (ТК), а также Всемирная база биоразнообразия GBIF (Гербарии и научные депозитарии GBIF доступны по ссылке: URL <https://doi.org/10.15468/dl.esjzs6>) и Plantarium (URL: <https://www.plantarium.ru/>), данные Флоры Сибири (Фризен, 1987) и Красной книги Томской области (Амельченко, 2013). Всего было извлечено 653 местонахождения и после исключения дублирующих точек или находящихся на расстоянии менее 30 км друг от друга (Brown, 2014), в анализ было включено 119 местонахождений *E. sibiricum*, при этом 25 % точек было использовано в качестве тестирующей выборки. Для выявления эколого-климатической ниши в качестве предикторов было использовано 19 биологически значимых переменных из базы данных WorldClim 2.0 (Hijmans et al., 2004) для современного климата.

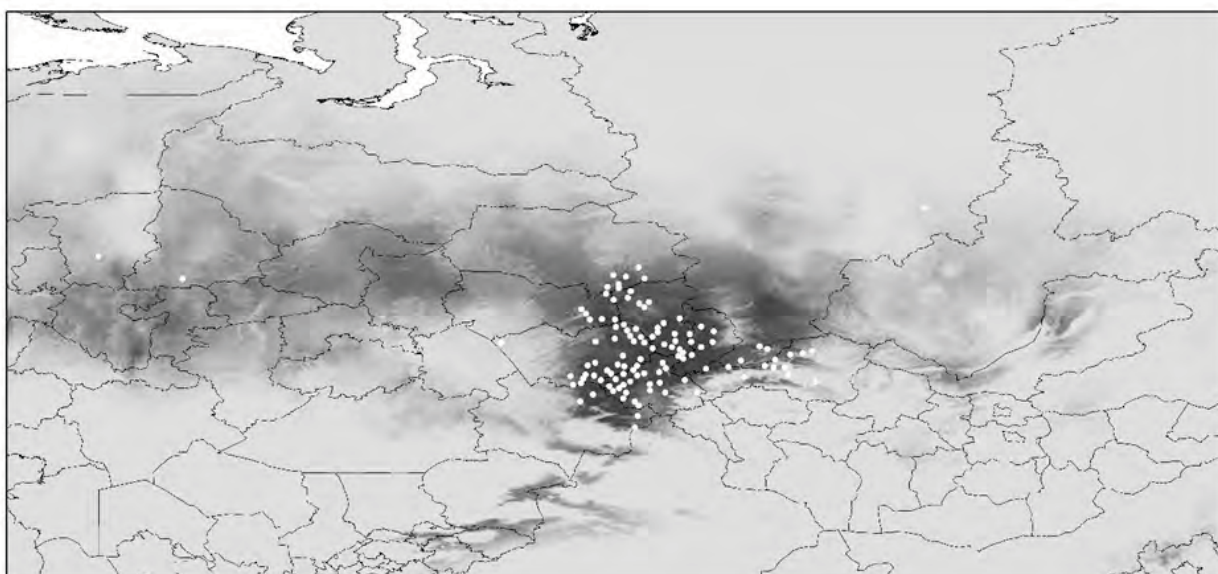
С помощью программы DIVA-GIS (Hijmans et al., 2011) были установлены частоты значений всех биоклиматических характеристик. Для моделирования территорий, пригодных по климатическим показателям для обитания и оценки пригодности и возможностей расширения ареала *E. sibiricum* был использован алгоритм MaxEnt (Phillips, Dudich, 2008), реализованный в R-среде (Osorio-Olvera et al., 2020). Визуализация полученного материала производилась в программе ArcGIS (ESRI, 2012). Для построения модели использовалось 6 независимых переменных (корреляция <0.7), выделенных при помощи алгоритма SDMToolbox (Brown, 2014) – Bio1, Bio2, Bio8, Bio10, Bio17, Bio18; также был установлен порог в 10 перцентилей, который предусматривал исключение из процесса 10 % точек, находящихся

ся в предельных (нетипичных) для вида климатических условиях (как это можно наблюдать с находками, которые обнаружены на Урале и востоке Красноярского края).

Результаты. Согласно результатам, температурные показатели (Bio1-11) демонстрируют более или менее нормальное распределение с довольно узкой амплитудой и пиковыми значениями. Признаки, характеризующие осадки (Bio12-19) показывают относительно нормальное распределение. Эти показатели в целом характерны для мезоморфных видов умеренного климата.

Оценка вклада переменных в построение модели с помощью пермутации показала, что наибольший вклад внесли показатели Bio1 – (32.2 %), Bio18 – (26.6 %), Bio2 – (23.9 %).

На основании полученной эколого-климатической ниши была построена модель территории пригодная по своим климатическим показателям для произрастания *E. sibiricum* (рис. 1).



Erythronium sibiricum

Рис. 1. Модель распространения *Erythronium sibiricum* в условиях современного климата. Условные обозначения: модель (тёмно-серый), *Erythronium sibiricum* (белые точки).

Для оценки прогностических возможностей полученной модели были вычислены AUC (Phillips et al., 2006) обучающей и тестирующей выборки, равные, соответственно, 0.961 и 0.947, стандартное отклонение – 0.017. Оба полученных значения AUC попадают в диапазон 0.8 – 0.9, что соответствует отличной дискриминации (Scheldeman, Van Zonneveld, 2010).

На основании полученной модели благоприятных условий для произрастания *E. sibiricum*, можно сделать вывод о том, что современное распространение вида намного уже, чем климатически обусловленная область благоприятного произрастания. Следовательно, можно предположить, что численность данного вида сильно зависит от других причин, таких как рубка леса в бесснежный период, повреждение почвенного покрова тяжёлой техникой, добыча полезных ископаемых, пожары, выпас скота, сбор цветов на букеты, особенно у населённых пунктов, а с другой, с высокой долей вероятности, не все его действительные местонахождения были выявлены. Все это подтверждает необходимость охраны *E. sibiricum* по всему ареалу. В качестве охранных мер можно выделить интродукцию данного вида, а также соблюдение режимов на ООПТ, где данный вид произрастает. Вместе с тем, выявление территории, климатически благоприятной для произрастания этого ценного в декоративном отношении вида, позволяет расширить область его выращивания и обогатить ассортимент сибирских городов и сел.

ЛИТЕРАТУРА

Амельченко В. П., Андреев В. Н., Жукова П. Г. Редкие и исчезающие растения Сибири / отв. ред. Л. И. Малышев, К. А. Соболевская. – Новосибирск: Наука: Сибирское отд-ние, 1980. – 224 с.

- Амельченко В. П., Катаева Т. Н., Зайкова Е. В.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Томской области. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Томск: Печатная мануфактура, 2013. – С. 318–319.
- Ачимова А. А.** Растения Горного Алтая в обычаях и традициях алтайцев. – Барнаул, 2012. – С. 41.
- Зубкус Л. П.** Некоторые особенности роста и развития кандыка сибирского – *Erythronium sibiricum* (Fischer et Mey. Kru.) в природе. // Тр. Бот.сада Западно-Сибирского филиала АН СССР, 1956. – Вып. 1. – С. 33–38.
- Красников А. А.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Новосибирской области. Животные. Растения и грибы / отв. ред. В. В. Глупов, Д. Н. Шауло. – Новосибирск: М-во природных ресурсов и экологии Новосибирской обл., 2018. – С. 390.
- Крылов П. Н.** Флора Западной Сибири // Изв. Имп. Томск. ун-та. – Томск, 1929. – Вып. 3. – 641 с.
- Куваев В. Б.** Кандык сибирский // Красная книга Российской Федерации (Растения и грибы). – Москва, 2008. – С. 319–320.
- Куприянов О. А.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Кузбасса. Том I. 3-е издание, перераб. и доп. – Кемерово: «ВЕКТОР-ПРИНТ», 2021. – С. 68.
- Лацинский Н. Н.** Высшие сосудистые растения // Флора Салаирского кряжа / отв. ред. Н. Н. Лацинский. – Новосибирск: Гео, 1997. – С. 155–251.
- Лучник З. И.** Декоративные растения Горного Алтая. – Москва: Сельхозгиз, 1951. – 244 с.
- Определитель растений Республики Алтай** / И. М. Красноборов и др.; отв. ред. И. М. Красноборов, И. А. Артемов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 701 с.
- Положий А. В.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Томской области. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2002. – С. 258–259.
- Свиридонов Г. М.** Полезные растения Горного Алтая: Применение, рацион. использование и охрана. – Горно-Алтайск: Алт. кн. изд-во. Гор.-Алт. отд-ние, 1978. – 231 с.
- Степанов Н. В.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Красноярского края. В 2 т. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений и грибов. Изд. 2, перераб. и доп. – Красноярск, 2012. – С. 198.
- Терёхина Т. А., Копытина Т. М.** Кандык сибирский – *Erythronium sibiricum* // Красная книга Алтайского края. Том 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных. – Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2016. – С. 126–127.
- Фризен Н. В.** *Erythronium* L. – Кандык // Флора Сибири. Araceae – Orchidaceae. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 103, 199.
- Brown J. L.** SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses // *Methods in Ecology and Evolution*, 2014. – Vol. 5, N 7. – P. 694–700.
- Busby J. R.** BIOCLIM – a bioclimate analysis and prediction system // *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis* / Margules C. R., Austin M. P. (eds.). – CSIRO: Melbourne. 1991. – P. 64–68.
- ESRI ArcGIS Desktop and Spatial Analyst Extension: Release 9.** Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, 2012. Available at: <http://www.esri.com> (Accessed: 27.01.2016).
- GBIF – Global Biodiversity Information Facility.** URL: <https://doi.org/10.15468/dl.esjzs6> (Accessed 05 May 2021)
- Hijmans R. J., Cameron S., Parra J.** Climate data from WorldClim, 2004. URL: <http://www.worldclim.org> (Accessed 20 May 2021).
- Hijmans R. J., Guarino L., Jarvis A. et al.** DIVA-GIS, version 5.2. Manual. 2011. URL: http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS5_manual.pdf (Accessed: 18 April 2016)
- Osorio-Olvera L., Lira-Noriega A., Soberón J., Townsend Peterson A., Falconi M., Contreras-Díaz R. G., Martínez-Meyer E., Barve V., Barve N.** ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods Ecol Evol.* Accepted Author Manuscript, 2020. DOI: 10.1111/2041-210X.13452
- Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E.** Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecological Modelling*, 2006. – Vol. 190. – P. 231–259.
- Phillips S. J., Dudich M.** Modelling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // *Ecography*, 2008. – Vol. 31. – P. 161–175.
- Plantarium.** Plants and lichens of Russia and neighboring countries: open online galleries and plant identification guide. 2007–2022. URL: <https://www.plantarium.ru/lang/en.html> (Accessed 05 May 2022).
- Scheldeman X., Van Zonneveld M.** Training manual on spatial analysis of plant diversity and distribution. – Rome: Biodiversity International, 2010. – 180 p.