

Климатическое моделирование потенциального ареала *Pulsatilla turczaninonii* Kryl. et Serg. (Ranunculaceae) на территории Евразии

© 2022. В. Ф. Зайков¹, аспирант, м. н. с.,
А. В. Ваганов^{1,2}, к. б. н., доцент, А. И. Шмаков¹, д. б. н., профессор,
¹Южно-Сибирский ботанический сад,
Алтайский государственный университет,
656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61,
²Сахалинский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН,
693023, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. А. М. Горького, д. 25,
e-mail: vz1703@mail.ru

Вид *Pulsatilla turczaninonii* Kryl. et Serg. является раннецветущим, декоративным растением, которое активно собирается человеком. Благодаря наличию лекарственных свойств у вида, сырьё используется в практике народной медицины. В связи с этим *P. turczaninonii* является редким и внесён в некоторые региональные Красные книги Российской Федерации. Исследование фондов ведущих Гербариев Евразии (LE, MW, B, VLA, NS (NSK), ALTB, PE), специальных литературных источников и личных наблюдений авторов в природе, позволило детализировать современный ареал вида. *Pulsatilla turczaninonii* занимает территорию Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока, Китая и Монголии, не выходя за пределы Северной Азии. Методом климатического моделирования на основе данных современного распространения вида и восьми биоклиматических переменных (отсевание коррелирующих переменных произведено в приложении SDMtoolbox) в программе MaxEnt был получен потенциальный ареал *P. turczaninonii*. По индексу AUC тестовой выборки прогнозная модель показала высокое качество интерпретации результата. Значение AUC составило 0,879±0,016. Тест пермутации выявил факторы, которые оказали наибольшее влияние на распределение *P. turczaninonii*. Среди этих факторов BIO1 (32,5%) – среднегодовая температура, BIO12 (21,9%) – среднегодовые осадки, BIO15 (16,4%) – сезонность осадков, BIO19 (11,5%) – осадки наиболее холодного квартала, самый низкий показатель – BIO8 (0,4%) – средняя температура наиболее влажного квартала.

Ключевые слова: ареал, Гербарий, климат, моделирование, редкий вид.

Climate modeling of the potential distribution area of *Pulsatilla turczaninonii* Kryl. et Serg. (Ranunculaceae) in Eurasia

© 2022. V. F. Zaykov¹ ORCID: 0000-0003-1641-9458^{*}
A. V. Vaganov^{1,2} ORCID: 0000-0002-7584-5150^{*} A. I. Shmakov¹ ORCID: 0000-0002-1052-4575^{*}
¹South-Siberian Botanical Garden, Altai State University,
61, Prospekt Lenina, Barnaul, Russia, 656049,
²Sakhalin Branch of the Botanical Garden Institute of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences,
25, Gorkogo St., Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 693023,
e-mail: vz1703@mail.ru

Pulsatilla turczaninonii Kryl. et Serg. is an early flowering, ornamental plant species collected actively by people. Due to the medicinal properties of the species, the raw material is used in traditional medicine. In this regard, *P. turczaninonii* is rare and is listed in some regional Red Data Books of the Russian Federation. A study of the funds of the leading Eurasian Herbaria (LE, MW, B, VLA, NS (NSK), ALTB, PE), special literary sources and personal observations of the authors in nature made it possible to detail the current distribution area of the species. *Pulsatilla turczaninonii* occupies the territory of Western and Eastern Siberia, the Far East, China and Mongolia, without going beyond the borders of North Asia. The potential area of *P. turczaninonii* was obtained using the climate modeling method based on the data of the modern distribution of the species and eight bioclimatic variables (screening out correlated variables was done in the SDMtoolbox application) in the MaxEnt program. According to the AUC index of the test sample, the predictive

model showed high quality of the result interpretation. The AUC value was 0.879 ± 0.016 . The permutation test revealed the factors with the greatest influence on the distribution of *P. turczaninovi*. The most important factors were: BIO1 (32.5%) – an average annual temperature, BIO12 (21.9%) – an average annual precipitation, BIO15 (16.1%) – a precipitation seasonality, BIO19 (11.5%) – a precipitation of the coldest quarter, the lowest factor was BIO8 (0.4%) – an average temperature of the wettest quarter.

Keywords: area, Herbarium, climate, modeling, rare species.

Геоинформационные системы помогают сегодня решать ряд важных задач, в том числе в ботанике. Одной из таких задач является оценка пространственного распределения объектов растительного мира. Как отмечается в [1], в настоящее время широко применяется моделирование пространственного распределения видов (экологическая ниша), которое позволяет установить связь местонахождений видов в природе и факторов окружающей среды, тем самым прогнозировать их распространение [2]. Тем не менее, нужно подчеркнуть, что речь идёт лишь о моделировании вероятностного распределения климатических условий, благоприятных для произрастания вида, не учитывая биологические особенности, конкурентные способности вида и прочие факторы.

Существует несколько методов климатического моделирования, таких как BIOCLIM [3], DOMAIN [4], MaxEnt [5, 6] и др. Наиболее эффективный и широко распространённый из перечисленных, как отмечает ряд авторов [1, 5–8], является MaxEnt (Maximum Entropy Species Distribution Modelling). Его важным достоинством является то, что для построения прогнозных карт достаточно лишь наличия участков присутствия вида. Данная возможность позволяет уточнить местонахождение того или иного таксона на территории с труднодоступной местностью.

Программа MaxEnt используется для решения природоохранных задач [1, 9, 10], выявления потенциального распространения инвазивных видов [1, 11, 12], оценки рисков для нативных видов при изменениях окружающей среды [1, 13], картографирования растительности [1, 14], исследования континуальных смен растительных сообществ [1, 15], исторических аспектов формирования биоразнообразия [1, 16], выявления параметров распределения видового богатства [1, 17].

Цель исследования – климатическое моделирование пригодных для расселения местообитаний *Pulsatilla turczaninovi*.

Объекты и методы исследования

Род *Pulsatilla* Mill. имеет голарктический ареал и насчитывает около 35–45 видов, из

которых половина являются эндемичными для отдельных территорий. Представители рода являются раннецветущими, декоративными, а некоторые виды – лекарственными. Ввиду того, что они активно собираются человеком на букеты и как лекарственное сырьё, большая часть представителей рода являются редкими и внесены в Красную книгу Российской Федерации [18], региональные Красные книги страны и некоторых стран Северной Азии. Одним из таких видов является и *Pulsatilla turczaninovi* Kryl. et Serg. (Прострел Турчанинова), описанный П.Н. Крыловым и Л.П. Сергиевской в 1930 г. [19] из степной части Алтайского края. Согласно данным [20–23] и уточнённых сведений по материалам ведущих гербариев Евразии (LE, MW, B, VLA, NS (NSK), ALTB, PE), *P. turczaninovi* представлен на территории Западной и Восточной Сибири, Дальнем Востоке, Китае и Монголии, не выходя сильно за пределы Северной Азии.

Анализ современного ареала *P. turczaninovi* и климатическое моделирование позволит произвести оценку экологических ниш на территории Евразии для установления новых местонахождений редкого вида.

Для подготовки карты распространения исследуемого вида использовали программу DIVA-GIS 7.5 [24] и Google Earth [25]. Моделирование прогнозного распространения вида производили методом максимальной энтропии в программе MaxEnt 4.4.1 [6]. Климатические данные 19 переменных были взяты из базы WORLDCLIM [26] (Bioclimatic variables: BIO1–BIO19: BIO1 – среднегодовая температура; BIO2 – суточные колебания температуры (среднемесячные); BIO3 – изотермальность (BIO1/ BIO7) $\times 100$; BIO4 – сезонность температуры (коэффициент вариации); BIO5 – максимальная температура наиболее тёплого периода; BIO6 – минимальная температура наиболее холодного периода; BIO7 – среднегодовая амплитуда колебания температуры (BIO5 – BIO6); BIO8 – средняя температура наиболее влажного квартала; BIO9 – средняя температура наиболее сухого квартала; BIO10 – средняя температура наиболее тёплого квартала; BIO11 – средняя температура наиболее

холодного квартала; BIO12 – среднегодовые осадки; BIO13 – осадки наиболее влажного периода; BIO14 – осадки наиболее сухого периода; BIO15 – сезонность осадков (коэффициент вариации); BIO16 – осадки наиболее влажного квартала; BIO17 – осадки наиболее сухого квартала; BIO18 – осадки наиболее тёплого квартала; BIO19 – осадки наиболее холодного квартала) за временной интервал с 1950 по 2000 гг., использовали климатическую модель с разрешением 2,5 arc-minutes (5 км на пиксель). Оценку вклада климатических параметров для моделирования производили по показателю «permutation importance» [6]. Произведена оценка вклада каждой переменной по «jackknife test» [5].

При работе с MaxEnt использовали следующие настройки: логистический выходной формат, 25% точек использовали как тестовую выборку, 75% – как обучающую. Оставшиеся настройки по умолчанию. Полученная модель в программе MaxEnt была спроецирована на карту, построенную с помощью программы DIVA-GIS.

Данные о распространении *P. turczaninonii* выявлены на основе этикеточных данных гербарных коллекций (LE, MW, B, VLA, NS (NSK), ALTB, PE). Данные о геопривязках с Гербариев MW, PE, B и NS(NSK) выгружены в формате Darwin Core с ресурса GBIF (Global Biodiversity Information Facility, www.gbif.org) [27]. Всего было учтено 122 участка местонахождения вида с геопривязками. Не использовались повторы координат. Определение вида произведено авторами.

Территория для моделирования прогнозного ареала *P. turczaninonii* в среде MaxEnt была выбрана шире, чем ареал обитания вида и ограничена следующим диапазоном координат Северной Азии: 63–142 в. д., 28–71 с. ш.

Между биоклиматическими переменными существует корреляция, способная исказить оценку вклада той или иной переменной в модель [28–30], в связи с чем в анализ были включены восемь биоклиматических переменных, корреляция между которыми не превышала значение 0,7. Высокоррелированные переменные выявлены с помощью программы SDMtoolbox [29], являющейся приложением к программе ArcGIS 10.5. Приложение позволяет также улучшить данные о присутствии (участки местонахождений).

Результаты и обсуждение

Обобщённые данные о распространении *P. turczaninonii* в 122 локациях позволили

детализировать и уточнить современное распространение вида на территории Евразии (рис. 1, см. цв. вкладку V).

По индексу AUC тестовой выборки прогнозная модель показала высокое качество интерпретации результата (рис. 2, см. цв. вкладку V). Значение AUC для *P. turczaninonii* составило $0,879 \pm 0,016$ (рис. 2б) (коэффициент оmissии + 0,04; кумулятивный порог + 1,6). На графике «а» – по оси ординат – фракционное значение, по оси абсцисс – кумулятивный порог (тестовая выборка – бирюзовая кривая, обучающая выборка – синяя кривая, исходные данные – красная кривая, предсказанная эмиссия – чёрная прямая), на графике «б» – по оси ординат – чувствительность, по оси абсцисс – специфичность (тестовая выборка – синяя кривая, обучающая выборка – красная кривая, случайное предсказание – чёрная прямая). На рисунке 2а можно увидеть, что тестовая кривая и обучающая кривая не совпадают со случайным предсказанием (чёрная прямая), что свидетельствует о достаточной ожидаемой способности полученной модели. Пороговое значение для 10 перцентилей обучающей выборки составило 0,337. Полученная модель прогнозного распространения вида в MaxEnt представлена на рисунке 3 (см. цв. вкладку VI), далее она была импортирована в DIVA-GIS (рис. 4, см. цв. вкладку VI).

Тест пермутации позволил выявить факторы, которые оказали наибольшее влияние на распределение *P. turczaninonii*. Наиболее важными факторами являются: BIO1 (32,5%) – среднегодовая температура, BIO12 (21,9%) – среднегодовые осадки, BIO15 (16,1%) – сезонность осадков, BIO19 (11,5%) – осадки наиболее холодного квартала, самый низкий показатель – BIO8 (0,4%) – средняя температура наиболее влажного квартала. Ещё одним из способов оценки вклада переменных в модель является «jackknife test», согласно ему, BIO1 так же является самым значительным фактором, на последнем месте – BIO7.

Заключение

Таким образом, в результате исследования был уточнён современный ареал *P. turczaninonii* и впервые проведён анализ климатического моделирования его экологических ниш на территории Евразии. Определены факторы, в наибольшей степени ограничивающие распространение вида: среднегодовая температура и среднегодовые осадки, дающие в сумме более 50%. Полученные данные могут служить

В. Ф. Зайков, А. В. Ваганов, А. И. Шмаков
«Климатическое моделирование потенциального ареала *Pulsatilla turczaninonii* Kryl. et Serg. (Ranunculaceae) на территории Евразии». С. 140.

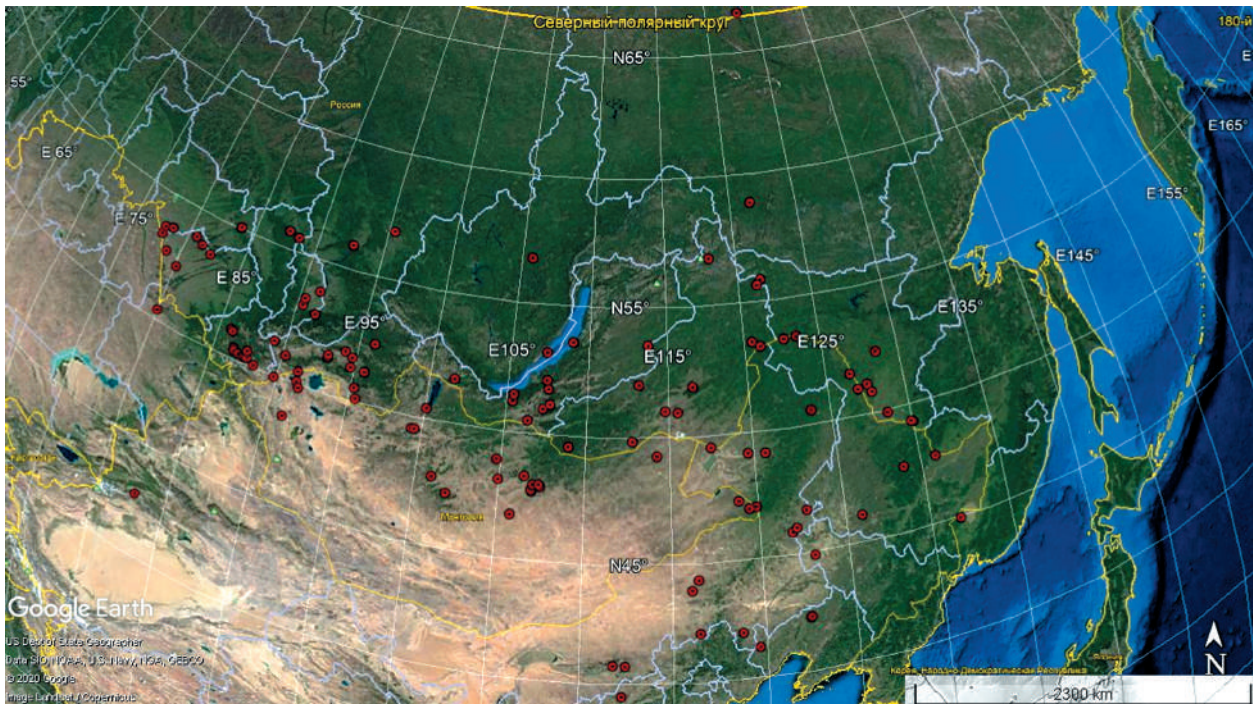


Рис. 1. Карта распространения *Pulsatilla turczaninonii* (Google Earth) (масштаб указан на карте). Границы государств отмечены жёлтым цветом
Fig. 1. Distribution map of *Pulsatilla turczaninonii* (Google Earth) (the scale is indicated on the map). State borders are marked in yellow

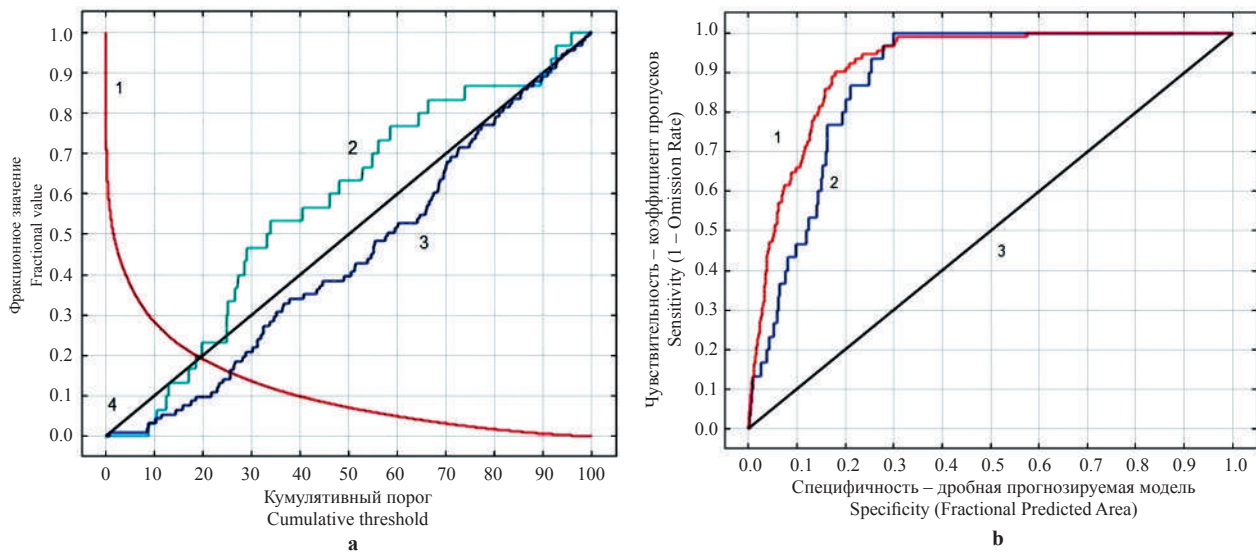


Рис. 2. Тестирование достоверности полученных данных для *Pulsatilla turczaninonii* (BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19):
 а) 1 – исходные данные; 2 – тестовая выборка; 3 – обучающая выборка; 4 – предсказанная эмиссия; б) 1 – обучающая выборка (AUC = 0,915); 2 – тестовая выборка (AUC = 0,879); 3 – случайное предсказание (AUC = 0,5)
Fig. 2. Testing of the reliability of the data obtained for *Pulsatilla turczaninonii* (BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19): а) 1 – fraction of background predicted; 2 – omission on test samples; 3 – omission on training samples; 4 – predicted omission; б) 1 – training date (AUC = 0.915); 2 – test date (AUC = 0.879); 3 – random prediction (AUC = 0.5)

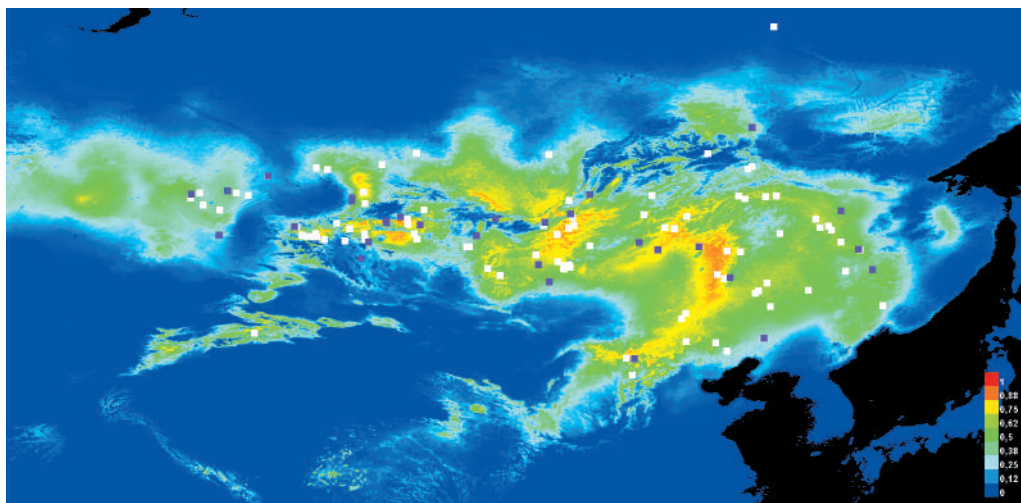


Рис. 3. Потенциальный ареал *Pulsatilla turczaninovii*, полученный на основании 8 биоклиматических переменных: WORLCLIM (Bioclimatic variables: BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19 интерполяция данных с 1950 по 2000 гг.). Качество модели по индексу пригодности местообитания таксона (AUC): 0,9–1 = «отлично», 0,8–0,9 = «хорошо», 0,7–0,8 = «удовлетворительно», 0,6–0,7 = «плохо», < 0,6 – «очень плохо» [6, 31].

Fig. 3. Potential distribution area of *Pulsatilla turczaninovii* based 8 bioclimatic variables: WORLCLIM (Bioclimatic variables: BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19 data interpolation from 1950 to 2000). Model quality by taxon habitat suitability index (AUC): 0.9–1 = “excellent”, 0.8–0.9 = “good”, 0.7–0.8 = “satisfactory”, 0.6–0.7 = “bad”, < 0.6 = “very bad” [6, 31].
 The points of the training sample are white squares, the test sample is purple

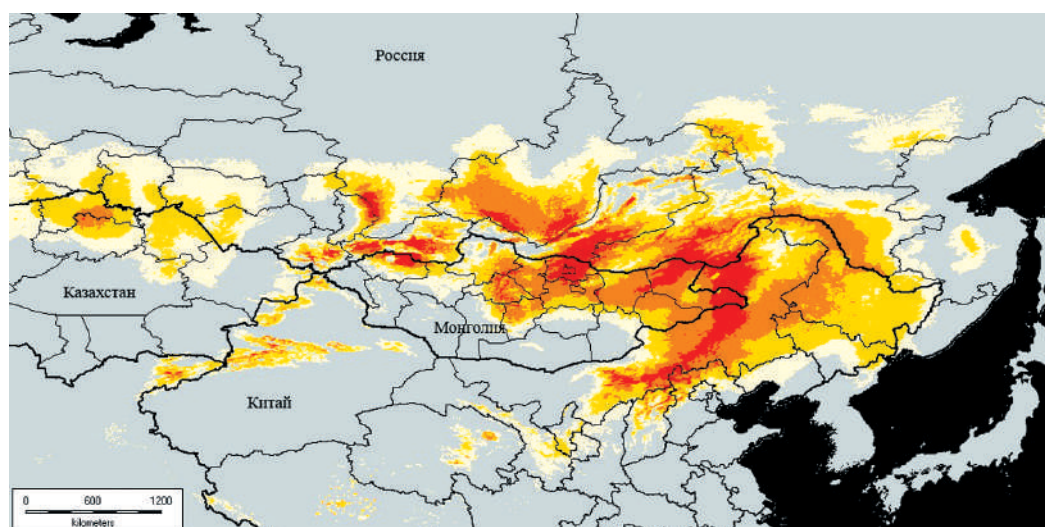


Рис. 4. Потенциальный ареал *Pulsatilla turczaninovii*, построенный в DIVA-GIS (масштаб указан на карте) на основе биоклиматических переменных: BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19 (интерполяция данных с 1950 по 2000 гг.). Качество модели по индексу пригодности местообитания таксона (AUC): 0,9–1 = «отлично» (красный), 0,8–0,9 = «хорошо» (оранжевый), 0,7–0,8 = «удовлетворительно» (жёлтый), 0,6–0,7 = «плохо» (светло-жёлтый), < 0,6 = «очень плохо» (серый)

Fig. 4. Potential distribution area of *Pulsatilla turczaninovii* made at DIVA-GIS (the scale is indicated on the map) using bioclimatic parameters BIO1, BIO2, BIO3, BIO7, BIO8, BIO12, BIO15, BIO19 (data interpolation from 1950 to 2000). Model quality by taxon habitat suitability index (AUC): 0.9–1 = “excellent” (red), 0.8–0.9 = “good” (orange), 0.7–0.8 = “satisfactory” (yellow), 0.6–0.7 = “bad” (light yellow), < 0.6 = “very bad” (gray)

опорой для поиска новых местонахождений вида. Настоящая работа дополняет исследования по мониторингу состояния растительности на территории Евразии [32]. Климатическая модель показала свою состоятельность ввиду высокого итогового значения AUC (0,879±0,016) и факта того, что прогнозная территория отражает современный ареал вида.

Работа поддержана средствами программы развития ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет» «Приоритет-2030».

References

1. Dudov S.V. Modeling of species distribution using topography and remote sensing data, with vascular plants of the Tukhuringra Range low mountain belt (Zeya Nature Reserve, Amur Region) as a case study // *Journal of General Biology*. 2016. V. 7. No. 1. P. 16–28 (in Russian).
2. Elith J., Leathwick J.R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time // *Annual Rev. Ecol. Evol. Systematics*. 2009. V. 40. P. 677–697. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159
3. Nix H. A biogeographic analysis of Australian Elapid snakes / Ed. R. Longmore. *Snakes: atlas of Elapid snakes of Australia*. 1986. No. 7. P. 4–15. doi: 10.1371/journal.pone.0050358
4. Carpenter G., Gillison A.N., Winte J. DOMAIN a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants, animals // *Biodivers. Conserv.* 1993. V. 2. P. 667–680. doi: 10.1007/BF00051966
5. Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions // *Ecol. Model.* 2006. V. 190. P. 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
6. Phillips S.J., Dudik M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation // *Ecography*. 2008. V. 31. P. 161–175. doi: 10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x
7. Olonova M.V., Gorina N.V., Mezina N.S. Using GIS technologies to assess the potential for establishment of alien plants in new territories // *Rogov Readings. Problems of Engineering Geology, Hydrogeology and Geoecology of Urbanized Territories: Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchenoy 85-letiyu so dnya rozhdeniya professora Gennadiya Markelovicha Rogova*. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2015. P. 229–234 (in Russian).
8. Sandanov D.V., Naidanov B.B. Spatial modeling of East-Asian plant species distribution: current condition and future dynamic under climatic change // *Rastitelnyy mir Aziatskoy Rossii*. 2015. No. 3 (19). P. 30–35 (in Russian).
9. Murray-Smith C., Brummitt N.A., Oliveira-Filho A.T., Bachman S., Moat J., Lughadha E.M., Lucas E.J. Plant diversity hotspots in the Atlantic coastal forests of Brazil // *Conserv. Biol.* 2009. V. 23. No. 1. P. 151–163. doi: 10.1111/j.1523-1739.2008.01075.x
10. Moran-Ordycze A., Suarez-Seoane S., Elith J., Calvo L., de Luis E. Satellite surface reflectance improves habitat distribution mapping: a case study on heath and shrub formations in the Cantabrian Mountains (NW Spain) // *Divers. Distrib.* 2012. V. 18. No. 6. P. 588–602. doi: 10.1111/j.1472-4642.2011.00855.x
11. Peterson E.B. Estimating cover of an invasive grass (*Bromus tectorum*) using tobit regression and phenology derived from two dates of Landsat ETM plus data // *International J. Remote Sensing*. 2005. V. 26. P. 2491–2507. doi: 10.1080/01431160500127815
12. Zimmermann H., Von Wehrden H., Damascos M.A., Bran D., Welk E., Renison D., Hensen I. Habitat invasion risk assessment based on Landsat 5 data, exemplified by the shrub *Rosa rubiginosa* in southern Argentina *Austral Ecology* // *Austral Ecology*. 2011. V. 36. No. 7. P. 870–880. doi: 10.1111/j.1442-9993.2010.02230.x
13. Thomas C.D., Cameron A., Green R.E., Bakkenes M., Beaumont L.J., Collingham Y.C., Erasmus B.F., De Siqueira M.F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., Van Jaarsveld A.S., Midgley G.F., Miles L., Ortega-Huerta M.A., Peterson A.T., Phillips O.L., Williams S.E. Extinction risk from climate change // *Nature*. 2004. V. 427. P. 145–148. doi: 10.1038/nature02121
14. Dobrowski S.Z., Safford H.D., Cheng Y.B., Ustin S.L. Mapping mountain vegetation using species distribution modeling, image-based texture analysis, and object-based classification // *Applied Vegetation Sci.* 2008. V. 11. P. 499–508. doi: 10.3170/2008-7-18560
15. Duff T.J., Bell T.L., York A. Recognising fuzzy vegetation pattern: the spatial prediction of floristically defined fuzzy communities using species distribution modelling methods // *J. Veg. Sci.* 2014. V. 25. P. 323–337. doi: 10.1111/jvs.12092
16. Svenning J.C., Normand S., Kageyama M. Glacial refugia of temperate trees in Europe: insights from species distribution modelling // *J. Ecology*. 2008. V. 96. No. 6. P. 1117–1127. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01422.x
17. Cord A.F., Klein D., Gernandt D.S., Perez de la Rosa J.A., Dech S. Remote sensing data can improve predictions of species richness by stacked species distribution models: a case study for Mexican pines // *J. Biogeography*. 2014. V. 41. No. 4. P. 736–748. doi: 10.1111/jbi.12225
18. Red Book of the Russian Federation / Eds. L.V. Bardunov, V.S. Novikov: Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 500 p. (in Russian).
19. Krylov P.N., Sergievskaya L.P. *Pulsatilla turczaninowii* Kryl. et Serg. sp. n. // *Sistematische zametki Gerbariya Tomskogo Universiteta*. 1930. No. 5–6. P. 1–2 (in Russian).

20. Yuzepchuk S.V. Rod prostrel – *Pulsatilla* Adans // Flora SSSR. Moskva, Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1937. V. 7. P. 294 (in Russian).
21. Wang W.T., Bartholomew B. *Pulsatilla* // Flora of China / Eds. Z.Y. Wu, P.H. Raven, D.Y. Hong. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis, 2001. V. 6. P. 329–333.
22. Timokhina S.A. *Pulsatilla* Miller – Prostrel // Flora Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1993. V. 6. P. 154 (in Russian).
23. Voroshilov V.N. Flora Sovetskogo Dalnego Vostoka. Moskva: Nauka, 1996. 476 p. (in Russian).
24. Hijmans R.J., Guarino L., Mathur P. DIVA-GIS, version 7.5. Manual. 2012 [Internet resource] http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS_manual_7.pdf (Accessed: 21.12.2019).
25. Google earth pro, Version: 7.3.2.5776 [Internet resource] <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (Accessed: 18.12.2019).
26. WorldClim. Global climate and weather data [Internet resource] <https://www.worldclim.org/> (Accessed: 21.12.2019).
27. Global Biodiversity Information Facility (GBIF) Occurrence Download [Internet resource] (Accessed: 20.12.2019). doi: 10.15468/dl.4khq61
28. Austin M. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches // *Ecol. Model.* 2007. V. 200. P. 1–19. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.07.005
29. Brown J.L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses // *Methods in Ecology and Evolution.* 2014. V. 5. No. 7. P. 694–700. doi: 10.1111/2041-210X.12200
30. Korznikov K.A. Climate Envelope Models of *Kalopanax septemlobus* and *Phellodendron amurense* var. *sachalinense* in the insular part of the Russian Far East // *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya.* 2019. No. 6. P. 648–657 (in Russian). doi: 10.1134/S1062359019040083
31. Swets J.A. Measuring the accuracy of diagnostic systems // *Science.* 1988. V. 240. P. 1285–1293.
32. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Reforestation study based on high resolution satellite imagery // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043