

## Перспективные инструменты для моделирования распространения степных реликтов Горного Алтая

### Promising tools for modelling the distribution of steppe relicts in the Altai Mountains

Иванов А. А., Ревушкин А. С.

Ivanov A. A., Revushkin A. S.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия. E-mails: ivanovandrew03@mail.ru, alrevushkin@gmail.ru

National Research Tomsk state university, Tomsk, Russia

**Реферат.** Решение вопросов сохранения биологического разнообразия невозможно без исследования распространения таксонов. Степные реликтовые виды – характерный элемент флоры Горного Алтая. При изучении их дизъюнктивного характера распространения требуется особая методология. Из-за экологической индивидуальности каждого вида моделирование его распространения должно носить индивидуальный характер. Предложен подход для моделирования распространения степных реликтов Горного Алтая с использованием ГИС-программ, специальных алгоритмов и программных средств, применение которого может давать интерпретируемые и качественно новые данные об особенностях распределения таксонов в естественной среде обитания. Важное значение при определении точности полученных моделей должен иметь собственный полевой опыт авторов. Приведен контекст, в котором может изучаться группа степных реликтовых видов для получения данных, значительно дополняющих представления об их биологии. Благодаря использованию рассмотренных в тексте статьи инструментов представляется возможным не только выявить отдельные экологические группы видов степных реликтов Горного Алтая, но и оценить степень их сопряженности.

**Ключевые слова.** География растений, ГИС-технологии, моделирование распространения видов, потенциально пригодные местообитания, Ecospat, MaxEnt.

**Summary.** Addressing biodiversity conservation requires studying taxa distribution. Steppe relict species represent a characteristic element of the Altai Mountain flora. Investigating their disjunctive distribution patterns demands specialised methodology. Due to each species' ecological individuality, distribution modelling must be species-specific. An approach is proposed for modelling the distribution of steppe relicts in the Altai Mountain using GIS software, specialised algorithms, and tools which yields interpretable, novel insights into taxa distribution patterns in natural habitats. The authors' field experience is crucial for validating model accuracy. Context is provided for analysing steppe relict groups, substantially enhancing understanding of their biology. The tools discussed enable not only identification of ecological groups among Altai Mountain steppe relicts but also assessment of their interconnectedness.

**Key words.** Ecospat, GIS technologies, MaxEnt, plant geography, potentially suitable habitats, species distribution modelling (SDM).

Степные реликтовые виды – характерный и неотъемлемый элемент флоры Горного Алтая. Они могут подразделяться на пустынно-степные и горно-степные группы (Иванов, Ревушкин, 2024). При изучении дизъюнктивного характера их распространения требуются особые методы и использование современных инструментов. Основные подходы, преимущества и ограничения методов, которые нужно учитывать при экологическом моделировании были хорошо описаны исследователями ранее (Санданов, 2019; Шитиков и др., 2021; Лисовский и др., 2022; Лисовский, Дудов, 2022). Самые перспективные и актуальные, по нашему убеждению, методы, алгоритмы и программные средства для моделирования распространения степных реликтов Горного Алтая рассмотрим в тексте настоящей статьи.

Основными источниками данных о распространении того или иного вида исторически служат литература и гербарные коллекции. В последние десятилетия значительно расширилось поле для сбора информации о местонахождениях видов в природе благодаря появлению баз данных: GBIF (GBIF

URL: <https://www.gbif.org>), iNaturalist (iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org>), Plantarium (Плантариум. URL: <https://www.plantarium.ru>). Но зачастую информация, представленная в этих ресурсах, может быть некорректной, поэтому пользователь должен по возможности уточнять и перепроверять её. Совместное использование баз данных, литературы, гербарных сборов и личных наблюдений авторов по фактам присутствия вида могут давать более полную картину при моделировании распространения таксонов.

В настоящее время базовым инструментом для изучения распространения таксона являются ГИС-технологии. При их использовании по точкам наблюдения вида можно строить точечно-контурные карты ареалов или предлагать авторские модели распространения вида, как это делалось нами ранее для пустынно-степных элементов во флоре Горного Алтая, многие из которых проявляют реликтовый характер (Ревушкин, Иванов, 2025). Такие операции с пространственными данными выполняются в геоинформационных пакетах: DIVA-GIS (DIVA-GIS. URL: <https://diva-gis.org>), QGIS (QGIS. URL: <https://www.qgis.org/>), ArcGIS Pro (ArcGIS Pro. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro>) и др. В каждой из программ есть свои особенности и уникальные средства для анализа, поэтому для наиболее эффективной работы следует уметь оперировать сразу несколькими такими пакетами. Пространственное прореживание точек (пространственная фильтрация) наблюдений с целью снижения эффекта неравномерности отбора данных удобно реализовано в инструменте SDMtoolbox 2.0 (SDMtoolbox. URL: <http://www.sdmtoolbox.org>), который можно интегрировать в программу ArcGIS Pro. Полученные на выходе данные допустимо использовать для построения гистограмм частот и биоклиматического конверта (Олонова, Гудкова, 2017), взяв за основу климатические параметры из современных открытых баз данных Chelsa (Chelsa. URL: <https://www.chelsa-climate.org>) или WorldClim (WorldClim. URL: <https://worldclim.org>). Это позволит не только определить значение того или иного климатического фактора для каждого вида в отдельности, но и оценить различия в экологических потребностях степных реликтов между собой. Данное обстоятельство может послужить основой при выделении конкретных экологических групп степных реликтов: солончаковых, опустыненных, петрофитных и др. (Иванов, Ревушкин, 2024). Современные ГИС-технологии достаточно просты в использовании, совместимы и взаимодополняемы, что делает их удобным инструментом для первичного моделирования распространения таксонов и подготовки данных для дальнейшей обработки.

Полученные в результате простейших ГИС-операций материалы должны быть подвергнуты статистической обработке и исключению взаимокоррелирующих данных. Для этого уже существует множество пакетов, каждый из которых может использоваться для оптимизации модели и повышения её прогностической эффективности, например: ENMeval (Muscarella et al., 2014), ENMTools (Warren et al., 2021) и др. После подготовки данных появляется возможность для использования популярного алгоритма MaxEnt (MaxEnt. URL: [https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent)), благодаря которому по анализу присутствия видов осуществимо моделирование наиболее пригодных территорий по топографическим и климатическим условиям для исследуемых таксонов. Это позволяет определить потенциальное современное распространение вида, выделить наиболее значимые параметры окружающей среды для таксона и дать оценку пригодности его местообитаний (Yi et al., 2016; Ma, Sun, 2018; Guo et al., 2023; He et al., 2023; Wang et al., 2024). Вместе с тем для прогнозирования изменений распространения видов и понимания динамики их потенциальных ареалов активно используются сценарии изменения климата в будущем (Yi et al., 2016; Ma, Sun, 2018; Guo et al., 2023; He et al., 2023; Wang et al., 2024; Wang et al., 2025). Это необходимо для планирования и реализации мероприятий по восстановлению популяций редких и краснокнижных видов, некоторые из которых являются реликтовыми (Yi et al., 2016; Wang et al., 2024), по регулированию и предотвращению угроз расширения ареалов инвазивных видов (Wang et al., 2025), по оценке запасов ценных хозяйственных и лекарственных видов (Yi et al., 2016; Ma, Sun, 2018; Guo et al., 2023; He et al., 2023; Wang et al., 2024) и т.д. Использование алгоритма MaxEnt способно давать полезные результаты даже при изучении мхов, распространение которых в меньшей степени можно связывать с климатическими условиями, так как они занимают микроместообитания (Писаренко, 2020). Некоторыми исследователями также выдвигается предположение о том, что благодаря использованию данной программы, появляется возможность выделения зон, по границе которых происходит сукцессионная смена видового состава сообществ (Шитиков и др., 2021). Кроме того, уже появляются попытки биоклиматического моделирования распределения высотно-поясных комплексов растительности с использованием MaxEnt, которые прогнозируют расширение степей и

полупустынь вдвое к 2040–2060 гг. (Парфенова, Чебакова, 2023), что также подчеркивает важность изучения распространения степных реликтов. Базы данных о климате (Chelsa, WorldClim) также содержат параметры климата прошлого, что может благополучно использоваться для уточнения существующих палеогеографических реконструкций. Большим преимуществом и одновременно недостатком данного алгоритма является необходимость использования индивидуального подхода при моделировании распространения каждого отдельного вида. Работа с узколокальными эндемиками и таксонами, имеющими дизъюнкции ареалов, требует от исследователя больших временных затрат при моделировании.

Новым витком в пространственном моделировании распределения видов является пакет Ecospat, реализованный в среде R (R Development Core Team). Данный инструмент позволяет с помощью комплексных подходов выполнять не только базовое моделирование на уровне отдельных видов, но и на уровне сообществ, в которых он встречается (Di Cola et al., 2017). Кроме того, в Ecospat уже становится возможным построение моделей распространения для редких и эндемичных видов благодаря алгоритму Ensemble of small models (ESM) (Di Cola et al., 2017), что представляется очень полезным для изучения степных реликтов, которые имеют дизъюнкции ареала. Однако такое моделирование распространения может быть не эффективно для внутривидовых таксонов, которые также имеют более локальное простираие. Объединение результатов моделирования таксонов более низкого уровня не всегда дает повторение модели построенной для таксона уровнем выше, то есть может давать отличные результаты о распространении вида в целом (Collart et al., 2021). Также имеются работы, в которых был использован Ecospat для оценки эквивалентности и дифференциации ниш близкородственных видов (Villaverde et al., 2017; Melton et al., 2022), прогнозирования динамики распространения видов (Villaverde et al., 2017; Wang et al., 2025).

Таким образом, в настоящее время существует много перспективных инструментов для моделирования распространения видов, позволяющих углубить знания о биологии отдельных таксонов и их сообществ. Вследствие экологической индивидуальности каждого вида возникает необходимость корректировки методологического подхода в каждом конкретном случае, в том числе при изучении группы степных реликтов. Вместе с тем собственный полевой опыт авторов будет иметь важное значение при критическом анализе полученных моделей и определении их точности. Благодаря использованию рассмотренных в тексте статьи инструментов представляется возможным не только выявить отдельные экологические группы видов степных реликтов Горного Алтая, но и оценить степень их сопряженности между собой.

## ЛИТЕРАТУРА

- Иванов А. А., Ревушкин А. С.** Степные реликты во флоре Горного Алтая // *Spiraeanthus*, 2024. – Вып. 1. – С 29–31. <https://doi.org/10.71130/spir-2024-1-29-31>
- Лисовский А. А., Дудов С. В.** Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 2. MaxEnt // *Журнал общей биологии*, 2022. – Т. 81, №2. – С. 135–146. <https://doi.org/10.31857/S0044459620020049>
- Лисовский А. А., Дудов С. В., Оболенская Е. В.** Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 1. Общие подходы // *Журнал общей биологии*, 2022. – Т. 81, № 2. – С. 123–134. <https://doi.org/10.31857/S0044459620020037>
- Олонова М. В., Гудкова П. Д.** Биоклиматическое моделирование: задания для практической работы и методические указания к их выполнению. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2017. – 50 с.
- Парфенова Е. И., Чебакова Н. М.** Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Северной Монголии в связи с прогнозируемыми изменениями климата к середине века // *Известия РАН. Серия географическая*, 2023. – Т. 87, №7. – С. 1019–1031. <https://doi.org/10.31857/S2587556623070129>
- Писаренко О. Ю.** Опыт применения алгоритма MaxEnt к анализу распределения видов мхов // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2020. – Т. 19, № 2. – С. 211–214. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020105>
- Плантариум.** Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2025. URL: <https://www.plantarium.ru>
- Ревушкин А. С., Иванов А. А.** Пустынно-степные элементы во флоре Горного Алтая // *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2025. – Т. 24, № 1. – С. 174–178. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2025035>
- Санданов Д. В.** Современные подходы к моделированию разнообразия и пространственному распределению видов растений: перспективы их применения в России // *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 2019. – № 46. – С. 82–114. <https://doi.org/10.17223/19988591/46/5>

- Шутиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д.** Экологические ниши, их современная интерпретация и перспективы моделирования // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии, 2021. – Т. 30, № 4. – С. 80–88. <https://doi.org/10.24412/2073-1035-2021-10427>
- ArcGIS Pro*. URL: <https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro>
- Chelsa*. URL: <https://www.chelsa-climate.org>
- Collart F., Hedenäs L., Broennimann O., Guisan A., Vanderpoorten A.** Intraspecific differentiation: Implications for niche and distribution modelling // Journal of Biogeography, 2021. – Vol. 48. – P. 415–426. <https://doi.org/10.1111/jbi.14009>
- Di Cola V., Broennimann O., Petitpierre B., Breiner F. T., D'Amen M., Randin C., Engler R., Pottier J., Pio D., Dubuis A., Pellissier L., Mateo R. G., Hordijk W., Salamin N., Guisan A.** Ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions // Ecography, 2017. – P. 001–014. <https://doi.org/10.1111/ecog.02671>
- DIVA-GIS*. URL: <https://diva-gis.org>
- GBIF*. URL: <https://www.gbif.org>
- Guo Y., Zhang S., Tang S., Pan J., Ren L., Tian X., Sun Z., Zhang Z.** Analysis of the prediction of the suitable distribution of *Polygonatum kingianum* under different climatic conditions based on the MaxEnt model // Front. Earth Sci., 2023. – Vol. 11. – 1111878. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1111878>
- He Y., Ma J., Chen G.** Potential geographical distribution and its multi-factor analysis of *Pinus massoniana* in China based on the maxent model // Ecological Indicators, 2023. – Vol. 154(2). – 110790. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110790>
- iNaturalist*. URL: <https://www.inaturalist.org>
- Ma B., Sun J.** Predicting the distribution of *Stipa purpurea* across the Tibetan Plateau via the MaxEnt model // BMC Ecology, 2018. – Vol. 18(1). – P. 10. <https://doi.org/10.1186/s12898-018-0165-0>
- MaxEnt*. URL: [https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent)
- Melton A. E., Clinton M. H., Wasoff D. N., Lu L., Hu H., Chen Z., Ma K., Soltis D. E., Soltis P. S.** Climatic niche comparisons of eastern North American and eastern Asian disjunct plant genera // Global Ecology and Biogeography, 2022. – Vol. 31. – P. 1290–1302. <https://doi.org/10.1111/geb.13504>
- Muscarella R., Galante P. J., Soley-Guardia M., Boria R. A., Kass J. M., Uriarte M., Anderson R. P.** ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MaxEnt ecological niche models // Methods in Ecology and Evolution, 2014. – Vol. 5. – P. 1198–1205. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>
- QGIS*. URL: <https://www.qgis.org>
- SDMtoolbox*. URL: <http://www.sdmtoolbox.org>
- Villaverde T., González-Moreno P., Rodríguez-Sánchez F., Escuder M.** Niche shifts after long-distance dispersal events in bipolar sedges (*Carex*, Cyperaceae) // American Journal of Botany, 2017. – Vol. 104 (11). – P. 1765–1774. <https://doi.org/10.3732/ajb.1700171>
- Wang J.-G., Wu J.-W., Li W.-J.** Ecological Niche Changes and Risk Regionalization of the Invasive Plant *Praxelis clematidea* // Ecology and Evolution, 2025. – Vol. 15. – e71546. <https://doi.org/10.1002/ece3.71546>
- Wang T., Li W., Cui H., Song Y., Liu C., Yan Q., Wu Y., Jia Y., Fang L., Qi L.** Predicting the Potential Habitat Distribution of Relict Plant *Davidia involucrata* in China Based on the MaxEnt Model // Forests, 2024. – Vol. 15. – P. 272. <https://doi.org/10.3390/f15020272>
- Warren D. L., Matzke N. J., Cardillo M., Baumgartner J. B., Beaumont L. J., Turelli M., Glor R. E., Huron N. A., Simões M., Iglesias T. L., Piquet J. C., Dinnage R.** ENMTools 1.0: an R package for comparative ecological biogeography // Ecography, 2021. – Vol. 44. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1111/ecog.05485>
- WorldClim*. URL: <https://worldclim.org>
- Yi Y.-j., Cheng X., Yang Z.-F., Zhang S.-H.** Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H. riparia* Lour) in Yunnan, China // Ecological Engineering, 2016. – P. 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.04.010>