

УДК 58.056(571.1+470.55/.58)

## Климатическое моделирование ареалов степных сообществ Западной Сибири и Южного Урала

### Climatic modeling of steppe plant communities distribution in Western Siberia and Southern Urals

А. Ю. Королюк<sup>1</sup>, М. В. Лебедева<sup>2</sup>, Д. В. Санданов<sup>3</sup>, Ю. С. Отмахов<sup>1</sup>

A. Yu. Korolyuk, M. V. Lebedeva, D. V. Sandanov, Yu. S. Otmakhov

<sup>1</sup>Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Новосибирск, Золотодолинская, 101  
E-mail: akorolyuk@rambler.ru, otmachov@mail.ru

<sup>2</sup>Ботанический сад-институт УНЦ РАН, 450080, Уфа, ул. Менделеева, 195/3. E-mail: lebedevamv@mail.ru

<sup>3</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: sdenis1178@mail.ru

**Реферат.** В статье обсуждаются возможности применения моделирования распространения растительных сообществ методом максимальной энтропии на базе программного пакета Maxent. В качестве тестовых объектов использованы 4 типа степных сообществ с территории Западной Сибири и Южного Урала. Для зональных луговых и настоящих степей Западно-Сибирской равнины прогнозируемые биоклиматические ареалы соответствуют широтным полосам в пределах степной и лесостепной зон. На примере анализа ранее опубликованных геоботанических описаний настоящих степей с территории Казахстана и Республики Башкортостан показано, что экстраполяция неполных данных имеет прогностическую ценность. Установлено, что для предгорных степей характерен разорванный ареал, что связано со сходством экологических условий предгорий Южного Урала и Алтая. Использование подходов биоклиматического моделирования позволяет подойти к вопросу выделения экологических аналогов в растительности удаленных регионов.

**Summary.** Modeling possibilities of plant communities distribution using maximum entropy methods on the base of Maxent program have been discussed. Four types of steppe communities from Western Siberia and Southern Urals are tested. Bioclimatic distribution of zonal meadow and typical steppes of Western Siberian Plain correspond to latitudinal bands of steppe and forest-steppe zones. On the base of analysis of previous relevés of typical steppes from Kazakhstan and Republic of Bashkortostan revealed that extrapolation of lacking data has the prognostic value. It is established that steppes at foothills has the disjunctive distribution, which is connected with similar ecological conditions of Southern Urals and Altai foothills. Bioclimatic modeling can be helpful in selection of ecological analogues in vegetation within distant regions.

Анализ закономерностей географического распространения биологических объектов является фундаментальной научной проблемой, которая тесно связана с историей формирования биосферы. В то же время исследования такого рода могут играть ключевую роль в прогнозировании динамических изменений экосистем в контексте глобальной и локальной эволюции природной среды. Познание этих закономерностей предоставляет возможности оценки перспектив дальнейшего существования видов и типов биоценозов, а также характера их ареалов под влиянием различных факторов. В настоящее время в связи с разработкой новых методов появилась возможность моделирования динамики ареалов видов растений и животных на основе анализа связей с климатическими параметрами, геосистемными характеристиками и структурой основных местообитаний (Guisan, Zimmermann, 2000; Douma et al., 2012 и др.). Ряд моделей также охватывает особенности распространения видов в зависимости от условий природопользования и инвазионных характеристик (Guisan, Thuiller, 2005). В современных исследованиях большое внимание уделяется моделированию географического распространения биологических видов методом максимальной энтропии на базе программного пакета Maxent (Phillips, Dudik, 2008). Если анализу ареалов растений посвящена обширная литература, то возможности использования данных технологий в изучении распространения типов растительных сообществ отражены в единичных публикациях (Triverdi et al., 2008; Trejo et al., 2011). Задачей нашего исследования была оценка перспектив использования алгоритмов, реализованных в пакете Maxent, для биоклиматического моделирования распространения типов степных сообществ.

В качестве объектов мы использовали 4 типа сообществ:

1. Настоящие разнотравно-дерновиннозлаковые степи Западно-Сибирской равнины. Сообщества данного типа широко распространены в пределах соответствующей широтной полосы в пределах Заволжско-Казахстанской степной провинции (Лавренко и др., 1991). Сообщества обычны в пределах степной зоны Западно-Сибирской равнины, а также представляют зональный тип сообществ сухих предгорий Западного Алтая (Королюк, 2007). Ценозы довольно бедные – в среднем 21 вид на описание. Одной из причин невысокого разнообразия является то, что данный тип уцелел от распашки преимущественно вблизи населенных пунктов и в настоящее время интенсивно используется в качестве пастбищных угодий. Постоянными доминантами являются *Stipa capillata* и *Festuca valesiaca*. Еще четыре вида нередко выступают содоминантами: *Artemisia frigida*, *Koeleria cristata*, *Artemisia austriaca*, *Carex supina*. С позиций эколого-флористической классификации данные степи относятся к ассоциации *Artemisio austriacae–Stipetum capillatae* Schubert et al. ex Korolyuk 2014 (Королюк, 2014). Массив проанализированных данных составил 99 описаний с точной географической привязкой.

2. Луговые богаторазнотравные степи Западно-Сибирской равнины обычны в северной части степной зоны и в южных районах лесостепи. В своем распространении они связаны с колочными и балочными ландшафтами. Это богатые ценозы – в среднем 55 видов на описание. Сообщества чаще полидоминантные, три вида выделяются своей активностью, при практически стопроцентной встречаемости они имеют среднее покрытие более 10 %: *Filipendula vulgaris*, *Fragaria viridis*, *Stipa pennata*. Остальные виды могут выступать как доминантами, так и содоминантами: *Poa angustifolia*, *Thymus marschallianus*, *Stipa zalesskii*, *Calamagrostis epigeios*, *Festuca valesiaca*, *Phlomis tuberosa*, *Carex praecox*, *Phleum phleoides*, *Peucedanum morisonii*, *Medicago falcata*, *Carex caryophylla*, *Artemisia pontica*, *Helictotrichon desertorum*, *Iris ruthenica*. Данные сообщества могут формировать крупные контуры, но чаще всего сохраняются в составе комплексов с солонцеватыми степями и колками. В последнем случае они могут обогащаться лугово-лесными растениями. С позиций эколого-флористической классификации они относятся к ассоциации *Trommsdorffio maculatae–Stipetum pennatae* Korolyuk 2014 (Королюк, 2014). Массив проанализированных данных составил 81 описание.

3. Луговые злаково-разнотравные степи северо-западных предгорий Алтая широко распространены на территории Бийско-Чумышской возвышенности и в соседствующих лесостепных предгорьях Салаира. До распашки водоразделов степи данного типа покрывали большие пространства, в настоящее время их фрагменты встречаются по балочным системам, где занимают пологие световые склоны, сочетаясь с тырсовыми степями по выпуклым и крутым участкам. Средняя видовая насыщенность составляет 40 видов на описание. Основными доминантами выступают ковыли (*Stipa pennata*, *S. capillata*), с которыми могут содоминировать *Calamagrostis epigeios*, *Medicago falcata*, *Filipendula vulgaris*, *Phlomis tuberosa*, *Vicia amoena*, *Adonis vernalis*, *Fragaria viridis*, *Veronica spicata*. Данные степи относятся к ассоциации *Filipendulo vulgaris–Stipetum capillatae* Makunina et al. 2010 (Макунина и др., 2010). Проанализированный массив составил 69 описаний с географической привязкой.

4. Луговые богаторазнотравные степи Предуралья и западного макросклона Южного Урала с преобладанием *Stipa pulcherrima* (Ямалов, Миркин, 2010). Сообщества ковыльных степей сохранились в местах с рельефом, неудобным для освоения в пашню – в средних и верхних частях световых склонов, реже по вершинам хребтов. Ценозы обычно встречаются на слабо каменистых почвах и больших площадях не занимают. Средняя видовая насыщенность составляет в среднем 58 видов на описание. В травостое доминируют *Stipa pulcherrima* и *Helictotrichon desertorum*, в качестве содоминантов выступают *Stipa capillata* и *Stipa pennata*. Также с высокой константностью представлены *Astragalus onobrychis*, *Salvia stepposa*, *Filipendula vulgaris*, *Campanula sibirica*, *Festuca pseudovina*, *Thalictrum minus*, *Plantago urvillei*. Вследствие слабой каменистости практически всех местообитаний во флористическом составе сообществ присутствует группа петрофитов – *Carex pediformis*, *Centaurea marschalliana*, *Alyssum tortuosum*, *Artemisia marschalliana*, *Allium rubens*. С позиции эколого-флористической классификации они относятся к ассоциации *Astragalo austriacae–Stipetum pulcherrimae* Yamalov 2011 nom. ined (Ямалов, 2011). Массив составил 47 описаний с географической привязкой.

Был проведен анализ 19 биоклиматических переменных BIOCLIM с разрешением 0.5 arc-minutes (~1 км<sup>2</sup> на пиксель), усредненных за временной интервал 1950–2000 гг. (www.worldclim.org). Для статистического анализа точности полученные модели проверялись случайной выборкой 25 % местонахождений сообществ. Также проводился тест для измерения важности переменной «jackknife», на каждую биокли-

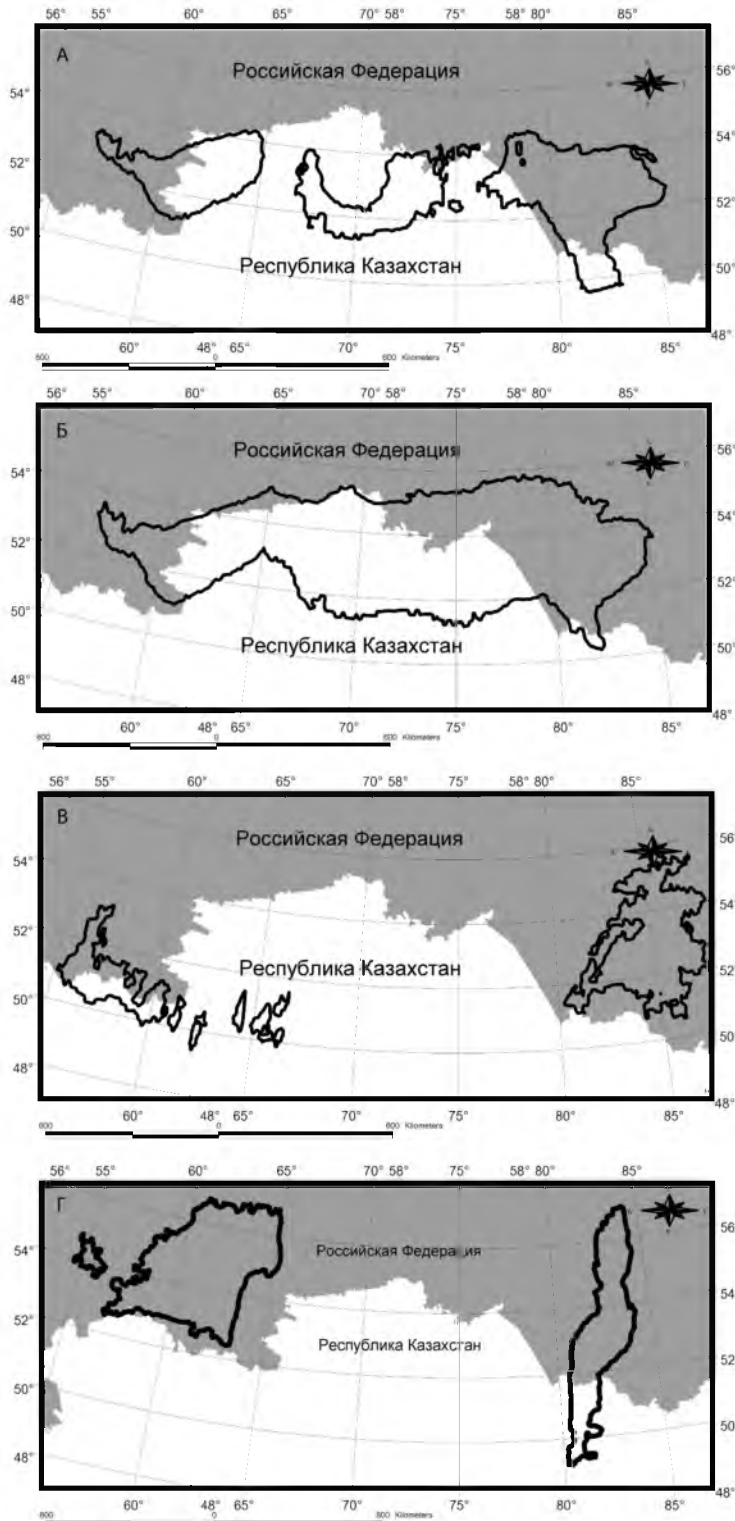


Рис. 1. Биоклиматические ареалы степных сообществ (при пороговом значении вероятности 0.4). Типы степных сообществ: А – настоящие степи Западно-Сибирской равнины, Б – луговые степи Западно-Сибирской равнины, В – луговые степи предгорий Алтая, Г – луговые степи предгорий Урала.

широтного характера (рис. 1В). Он состоит из двух основных частей, более крупный из которых охватывает предгорья и периферийные низкогорья Алтая и Салаирского кряжа (Алтайский край), а также Кузнецкую котловину (Кемеровская область). Вторая часть ареала лежит в южных районах Оренбургской области и на севере Актыубинской области. Разорванным ареалом также характеризуются южноуральские луговые степи

математическую переменную были построены кривые отклика. В итоговых картах использовали логистический выходной формат с градациями от 0 до 1, позволяющий оценивать вероятность пространственного распределения типов растительных сообществ. Дальнейший анализ пространственных данных выполнялся в пакетах ArcGIS 10.0 и DIVA-GIS.

Анализ биоклиматических ареалов (далее ареалов) двух типов степных сообществ, распространенных на территории Западно-Сибирской равнины, показал ожидаемое зональное распределение. Настоящие степи имеют ареал в виде широтной полосы, протягивающейся от Южного Урала до предгорий Северо-Западного Алтая (рис. 1А). Центральная ось широтной полосы лежит в пределах 5–54 градусов северной широты. На территории России потенциальный ареал данного типа степей охватывает степную часть Алтайского края, юго-западные районы Новосибирской области, южные части Челябинской области и Республики Башкортостан. Основная часть ареала располагается в пределах Северного Казахстана, по которому у нас отсутствовали данные с точными географическими привязками. Таким образом, использование алгоритмов Maxent дало возможность экстраполяции результатов по явно неполным данным. Для проверки правильности прогнозных результатов мы использовали опубликованные материалы, которые смогли отнести к анализируемому типу сообществ (Исаченко, Рачковская, 1961; Schubert, 1981). Данные работы подтвердили реальное присутствие анализируемых степей в построенном биоклиматическом ареале. Ареал луговых степей Западно-Сибирской равнины имеет сходный ареал, но его северная граница лежит около 55 градуса северной широты (рис. 1Б). Таким образом, данные степи, помимо северной части степной зоны, могут встречаться и в лесостепной зоне, что подтверждается нашими полевыми наблюдениями. В отличие от настоящих степей, ареал анализируемого типа сообществ на территории России захватывает южные части Новосибирской, Омской и Курганской областей.

Ареал луговых степей, описанных из северо-западных предгорий Алтая не имеет

(рис. 1Г). Основная его часть занимает западную часть Республики Башкортостан, северо-запад Оренбургской области, восточные районы Самарской области и Республики Татарстан. Восточная часть ареала лежит в предгорьях Алтая, Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау.

В целом, оценивая перспективы использования подходов биоклиматического моделирования ареалов растительных сообществ с использованием программного пакета Maxent, можно говорить о перспективности таких работ. Так, для зональных степей Западной Сибири, применение этих подходов позволило экстраполировать фрагментарные данные о конкретных местонахождениях на значительные территории, не изученные в этом отношении. Для предгорных и низкогорных сообществ применение описываемых методик позволило выявить территории, аналогичные по биоклиматическим показателям. Это позволяет подойти к решению вопросов выделения экологических аналогов для типов растительных сообществ, которые будут учитывать климатические показатели, характеристики эдафотопов и биогеографические особенности регионов. Также перспективным нам видится прогнозное моделирование изменения ареалов растительных сообществ, связанное с глобальной динамикой климата.

**Благодарности.** Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-05-00908 и 16-04-00747).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Исаченко Т. И., Рачковская Е. И.* Основные зональные типы степей Северного Казахстана // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 3, Геоботаника. – Л., 1961. – С. 133–397.
- Королюк А. Ю.* Степная растительность (Festuco-Brometea) предгорий Западного Алтая // Растительность России, 2007 – № 10. – С. 38–60.
- Королюк А. Ю.* Сообщества класса Festuco-Brometea на территории Западно-Сибирской равнины // Растительность России, 2014. – № 25. – С. 45–70.
- Лауренко Е. М., Карамышева З. В., Никулина Р. И.* Степи Евразии. – Л., 1991. – 146 с.
- Макунина Н. И., Королюк А. Ю., Мальцева Т. В.* Растительность Бийско-Чумышской возвышенности // Растительность России, 2010. – № 16. – С. 40–55.
- Ямалов С. М., Миркин Б. М.* Флористическая и географическая дифференциация настоящих и луговых степей Южного Урала // Растительный мир Азиатской России, 2010. – № 2. – С. 58–65.
- Ямалов С. М.* Синтаксономия и динамика травяной растительности Южно-Уральского региона: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. – Уфа, 2011. – 32 с.
- 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. – Vol. 35. – P. 294–305.
- Guisan A., Thuiller W.* Predicting species distribution: offering more than simple habitat models // *Ecological Letters*, 2005 – Vol. 8. – P. 993–1009.
- Guisan A., Zimmermann N. E.* Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*, 2000. – Vol. 135. – P. 147–186.
- Schubert R., Jager E., Mahn E.-G.* Vergleichende geobotanische Untersuchungen in der Baschkirischen ASSR. 2. Xerotherme Gebusche, Xerothermrassen, Ackerundkrautgesellschaften // *Wiss. Z. Univ. Halle. Math.-nat. Bd*, 1981. – No. 30 – P. 83–113.
- Trejo I., Martinez-Meyer E., Calixto-Perez E., Sanchez-Colon S., Vasquez de la Torre R., Villers-Ruiz L.* Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México // *Atmosfera*, 2011. – Vol. 24(1). – P. 1–14.
- Trivedi M. R., Morecroft M. D., Berry P. M., Dawson T P.* Potential effects of climate change on plant communities in three montane nature reserves in Scotland, UK // *Biological Conservation*, 2008. – Vol. 141. – P. 1665–1675.
- Phillips S. J., Dudik M.* Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // *Ecography*, 2008. – Vol. 31. – P. 161–175.