

НАЗЕМНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии.
2021. – Т. 30. – № 4. – С. 29-34.

УДК 581.9

DOI 10.24412/2073-1035-2022-10434

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БИОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АРЕАЛ *TANACETUM KITTARYANUM* (С.А. МЕУ.) TZVELEV

© 2022 Е.А. Архипова, М.В. Степанов, Р.Р. Феткуллина

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов (Россия)

Поступила 25.09.2021

Аннотация. Предпринята попытка моделирования биоклиматического ареала *Tanacetum kittaryanum* (С.А. Меу.) Tzvelev s. l. методом максимальной энтропии на основе фондов гербария Саратовского государственного университета (SARAT) и базы данных GBIF. Наибольший вклад в построение модели внесли сезонность температуры, осадки самого сухого месяца, сезонность выпадения осадков.

Ключевые слова: *Tanacetum kittaryanum*, MaxEnt-моделирование, биоклиматические параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Tanacetum kittaryanum (С.А. Меу.) Tzvelev – короткокорневищный многолетний полукустарничек, полиморфный вид, предпочитает каменистые разнотравные степи, меловые и мергелистые обнажения, реже встречается в каменисто-песчаных степях на карбонатных субстратах (Флора СССР, 1961; Флора европейской..., 1994; Маевский, 2014). Согласно Н.Н. Цвелёву (Флора европейской..., 1994), *T. kittaryanum* представлен тремя подвидами: 1) subsp. *Kittaryanum*; 2) описанным из окрестностей г. Хвалынский и считающимся эндемиком этой территории subsp. *sclerophyllum* (Krasch.) Tzvelev; 3) subsp. *uralense* (Krasch.) Tzvelev. Два последних отличаются друг от друга нестойкими признаками, причем корреляция с их распространением выражена неотчётливо (Буланый, 2010). Объем вида авторами статьи принимается в рамках представлений современных исследователей (Еленевский и др., 2008). Номенклатура вида приведена согласно The World Checklist of Vascular Plants (WCVP, 2021).

Выявление закономерностей распределения видов – один из ключевых вопросов современных

ботанических исследований. Возможным подходом к решению данной задачи является анализ взаимосвязей между местами обитания видов и факторами окружающей среды (Писаренко, 2020). В качестве эффективного алгоритма моделирования климатических условий и пространственного распространения видов все большую популярность набирает метод максимальной энтропии, реализуемый в программе MaxEnt (Phillips, Dudik, 2008; Phillips et al., 2017).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В методе максимальной энтропии используется информация о параметрах среды в известных местонахождениях вида и определяется вероятность его присутствия на остальной территории.

Информация о местах сбора *T. kittaryanum* s. l. была взята из базы данных гербария Саратовского государственного университета (SARAT) и из базы данных глобальной информационной системы о биоразнообразии (GBIF, 2021). Гербарий СГУ (SARAT) является крупнейшей гербарной коллекцией на территории Нижнего Поволжья, входит в международный Союз гербариев мира. Фонды содержат значительный материал с территории юго-востока Восточной Европы (Саратовская, Астраханская, Волгоградская, Самарская, Оренбургская, Пензенская и Ульяновская области, Западный Казахстан). Все сборы были проверены и в случае необходимости переопределены. Всего было использовано 500 точек, из них уникальных 115 (66 из гербария СГУ

Архипова Екатерина Александровна, доцент, канд. биол. наук, arhipova@mail.ru; Степанов Михаил Владимирович, доцент, канд. биол. наук; Феткуллина Роза Равиловна, ст. лаборант

(SARAT), 49 из GBIF). Исходные данные местонахождений вида оформлялись в виде таблицы в соответствии с требованиями программы (Maxent Phillips, Dudik, 2008).

В данной работе были использованы 19 климатических переменных (табл. 1) – это слои био-

климатической информации мировой базы WorldClim (WorldClim, 2020; Hijmans et al., 2005) по сетке географических координат с разрешением 2,5 минуты.

Таблица 1

Биологически значимые климатические переменные
Biologically significant climatic variables

BIO1	Среднегодовая температура
BIO2	Среднемесячная суточная амплитуда температуры
BIO3	Изотермальность (BIO1/ BIO7) x 100
BIO4	Сезонность температуры (коэффициент вариации)
BIO5	Максимальная температура наиболее теплого месяца
BIO6	Минимальная температура наиболее холодного месяца
BIO7	Среднегодовая амплитуда колебания температуры (BIO5 – BIO6)
BIO8	Средняя температура наиболее влажного квартала
BIO9	Средняя температура наиболее сухого квартала
BIO10	Средняя температура наиболее теплого квартала
BIO11	Средняя температура самого холодного квартала
BIO12	Среднегодовые осадки
BIO13	Осадки самого влажного месяца
BIO14	Осадки самого сухого месяца
BIO15	Сезонность выпадения осадков (коэффициент вариации)
BIO16	Осадки самого влажного квартала
BIO17	Осадки самого сухого квартала
BIO18	Осадки самого теплого квартала
BIO19	Осадки самого холодного квартала

В этих растрах содержится информация по климатическим параметрам, которая представляет собой пространственную интерполяцию данных с метеостанций мира за период 1970–2000 гг. 19 климатических переменных и их комбинации были выбраны на основе биологической значимости для распространения отдельных видов растений и прошли апробацию в других исследованиях (Куликова и др., 2018; Исаев и др., 2019). Используются тематические растровые слои с пространственным разрешением около 1 км². Данные предназначены для экологического и геоинформационного моделирования, находятся в свободном доступе для научных исследований и некоммерческого использования. Для био-климатического моделирования использовался MaxEnt, визуализация данных и пространственный анализ результатов моделирования проводились в геоинформационной среде: бесплатная Diva-GIS, находящаяся в свободном доступе (DIVA-GIS, 2021). Анализ распространения вида проводился по сводке «Флора СССР» (1961) в соответствии с принятым в нем.

Для анализа был выбран порог в 10 процентов. Это значит, что 10% точек не включаются в анализ и соответствующие им местообитания

расцениваются как нетипичные. Пороговое значение в нашем случае равно 0,3, то есть климатические условия территорий, окрашенных нейтральным цветом (0–0,3) будут оцениваться как не подходящие для вида и выходящие за пределы его эколого-климатической ниши.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате моделирования была получена карта, на которой с помощью градаций цвета обозначается вероятность нахождения вида в конкретной точке. Точность модели подтверждает высокий показатель AUC (*Area Under Curve*), для тренировочных данных он составляет 0.994 и для тестовых данных – 0.995.

Во «Флоре СССР» (1961) указывается следующая область распространения *T. kittaryanum* s. l.: юго-восточная часть Волжско-Камского, Заволжье, северная часть Нижне-Волжского, южная часть Верхне-Тобольского и Иртышского, западные предгорья Алтайского, северная часть Арало-Каспийского, северная часть Прибалхашского районов. Модель демонстрирует, что в современных климатических условиях, исходя из имеющегося набора данных (координат), *T. kittaryanum* с вероятностью более 70% может встречаться на территории Саратовской, Самар-

ской, Ульяновской, Оренбургской областей, в Республике Башкортостан, в Алтайском крае и в Восточно-Казахстанской области Казахстана, что расширяет ареал из «Флоры СССР» (рис. 1).

Кроме того, определен еще один участок, подходящий для существования вида (рис. 2).

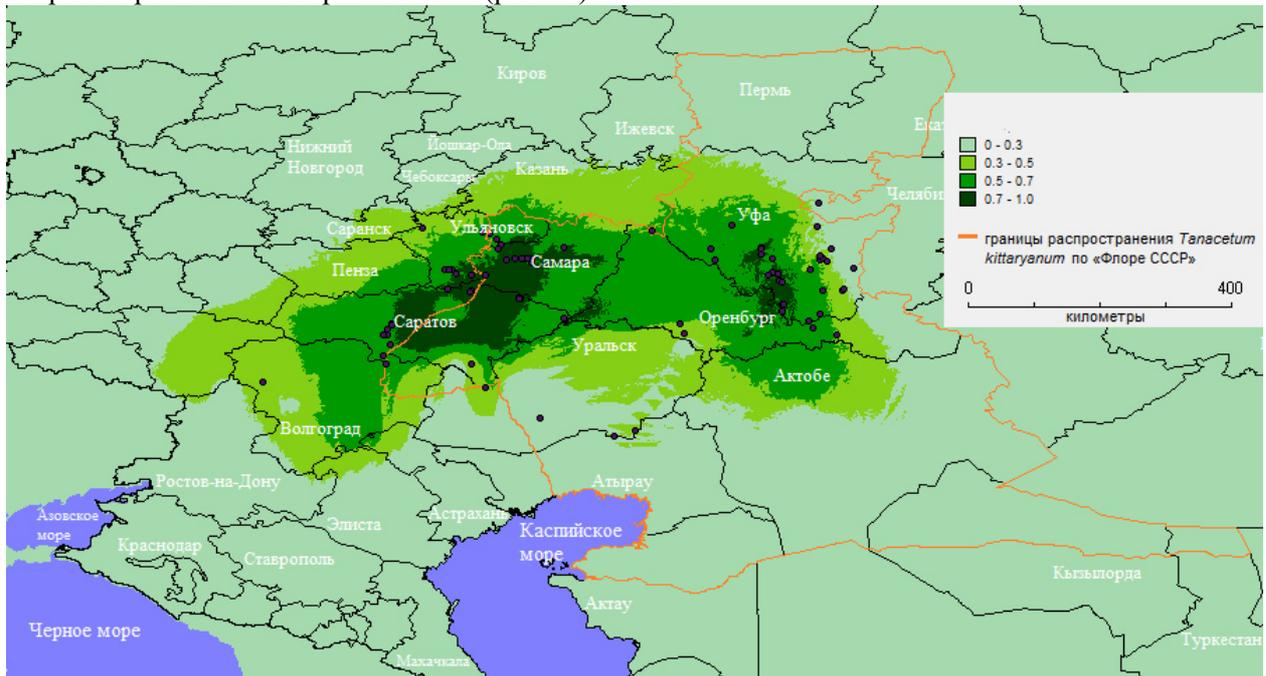


Рис 1. Часть ареала *T. kittaryanum* s. l., примерно совпадающая с указанным во «Флоре СССР».
Fig. 1. Part of the range of *T. kittaryanum* s. l., approximately coinciding with the one indicated in the "Flora of the USSR".

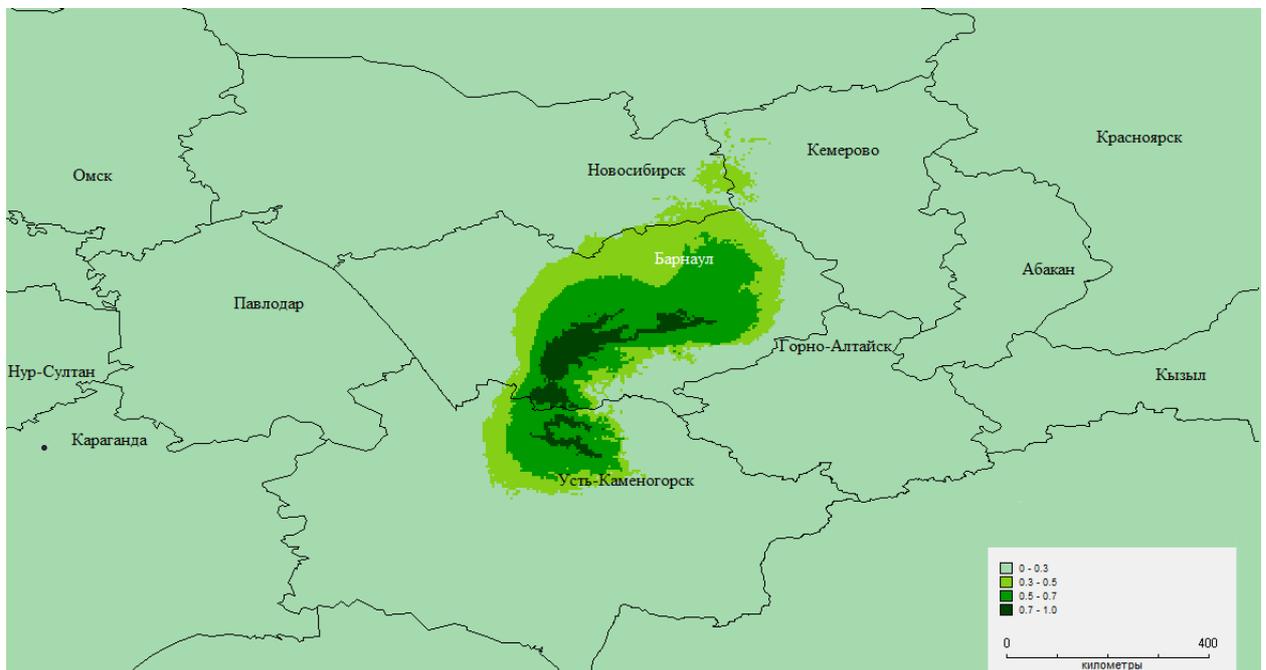


Рис 2. Часть ареала *T. kittaryanum* s. l., выходящая за пределы указанного во «Флоре СССР».
Fig. 2. Part of the range of *T. kittaryanum* s. l., beyond the limits specified in the "Flora of the USSR".

Пространственные данные о параметрах окружающей среды – предикторы – часто имеют взаимную корреляцию. Это может являться причиной нестабильности модели и вносить ошибку в результаты (Dormann et al., 2013). Тем не менее, MaxEnt устойчив к влиянию взаимно коррелирующих предикторов (Elith et al., 2011) благодаря параметризации, поэтому даже если переменные сильно связаны, это не приводит к заметным искажениям предсказанного пространственного распределения (Лисовский, Дудов, 2020).

Пространственные данные о параметрах окружающей среды – предикторы – часто имеют взаимную корреляцию. Это может являться причиной нестабильности модели и вносить ошибку в результаты (Dormann et al., 2013). Тем не менее, MaxEnt устойчив к влиянию взаимно коррелирующих предикторов (Elith et al., 2011) благодаря параметризации, поэтому даже если переменные сильно связаны, это не приводит к заметным искажениям предсказанного пространственного распределения (Лисовский, Дудов, 2020).

Анализ вклада различных климатических параметров в модель потенциального ареала (Олонова, Гудкова, 2017) позволяет по полученным

данным выявить наиболее существенные экологические факторы, лимитирующие распространение вида (табл. 2).

Таблица 2

Вклад в модель ареала *T. kittaryanum* s. l. и индекс важности пермутации для биоклиматических переменных
Contribution to the range model of *T. kittaryanum* s. l. and the index of importance of permutation for bioclimatic variables

Параметры	Вклад, %	Важность при пермутации, %
Сезонность температуры (коэффициент вариации)	36,5	52,6
Осадки самого сухого месяца	22,5	4,4
Сезонность выпадения осадков (коэффициент вариации)	11,1	6,2
Среднегодовая температура	10,1	2,2
Средняя температура наиболее теплого квартала	8,6	0
Осадки самого влажного месяца	5,3	0,8
Осадки самого теплого квартала	2,1	6,9
Минимальная температура наиболее холодного месяца	1,5	10,3
Среднегодовые осадки	0,8	2,8
Максимальная температура наиболее теплого месяца	0,8	0,1
Средняя температура самого холодного квартала	0,5	12,7
Средняя температура наиболее сухого квартала	0,3	1,1
Среднемесячная суточная амплитуда температуры	0	0
Средняя температура наиболее влажного квартала	0	0
Осадки самого влажного квартала	0	0
Среднегодовая амплитуда колебания температуры	0	0
Осадки самого сухого квартала	0	0
Осадки самого холодного квартала	0	0
Изотермальность	0	0

Как следует из табл. 2, наибольший вклад в построение модели внесли сезонность температуры (36,5), осадки самого сухого месяца (22,5), сезонность выпадения осадков (11,1). Между этими параметрами были рассчитаны коэффициенты Спирмена, их значения оказались в пределах от 0,3 до 0,5, что еще более подтверждает предложенную модель. После пермутации снизилась значимость параметров, касающихся количества осадков (осадки самого сухого месяца и сезонность выпадения осадков). Более важными для построения модели оказались параметры, отражающие низкие температуры (средняя температура самого холодного квартала, минимальная температура наиболее холодного месяца). Возможно, это связано с особенностями местобитаний изучаемого вида – поскольку он часто встречается на выходах мела, то именно измене-

ния количества осадков во времени и самые низкие температуры оказывают наибольшее влияние на расширение ареала *T. kittaryanum* s. l.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При моделировании биоклиматического ареала *T. kittaryanum* s. l. методом максимальной энтропии были получены данные, расширяющие возможный ареал изученного вида. Установлены климатические параметры, влияющие на расселение вида, в которых существование вида оптимально. Наибольший вклад в построение модели внесли сезонность температуры, осадки самого сухого месяца, сезонность выпадения осадков, а также параметры, связанные с особенностями субстрата.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список русскоязычной литературы

Буланый Ю.И. Флора Саратовской области: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 498 с.
 Еленевский А.Г., Буланый Ю.И., Радыгина В.И. Конспект флоры Саратовской области. Саратов: Наука, 2008. 232 с.

Исаев А.П., Борисов Б.З., Никифорова Е.Н. Биоклиматическое моделирование ареала сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 3. С. 121-133. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-3-11

Куликова Л.В., Петрова Н.А., Кашин А.С. Потенциальный биоклиматический ареал *Calophaca wolgarica* (L. Fl.) DC в связи с выбором мест для его реинтродукции в Саратовскую область // Бюл. Ботанического сада Сарат. гос. университета. 2018. Т. 16, вып. 4. С. 38-48. DOI: 10.18500/1682-1637-2018-4-38-48

Лисовский А.А., Дудов С.В. Преимущества и ограничения методов экологического моделирования ареалов. 2. MaxEnt // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81, № 2. С. 135-146. DOI: 10.31857/S0044459620020049

Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2014. 635 с.

Олонова М.В., Гудкова П.Д. Биоклиматическое моделирование: задания для практической работы и методические указания к их выполнению. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. 50 с. DOI: 10.18500/1682-1637-2018-4-38-48

Писаренко О.Ю. Опыт применения алгоритма MaxEnt к анализу распределения видов мхов // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. № 19-2. С. 211-214. DOI: 10.14258/pbssm.2020105

Флора СССР. Т. 26 / под ред.: В.Л. Комаров, Б.К. Шишкин, Е.Г. Бобров. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 919 с.

Флора европейской части СССР. Т. VII / отв. ред. и ред. тома Н.Н. Цвелев. СПб.: Наука, 1994. 317 с.

Reference List

Bulany Yu.I. Flora of the Saratov obalst: Dissertation ... Doctor of Biological Sciences. Moscow, 2010. 498 p. (In Russian).

Elenevsky A.G., Bulany Yu.I., Radygina V.I. Synopsis of the flora of the Saratov oblast. Saratov: Nauka, 2008. 232 p. (In Russian).

Isaev A.P., Borisov B.Z., Nikiforova E.N. Bioclimatic modeling of the ordinary pine area (*Pinus sylvestris* L.) in Yakutia // Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2019. Т. 24, No. 3. P. 121-133. (In Russian). DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-3-11

Kulikova L.V., Petrova N.A., Kashin A.S. 2018. Potential bioclimatic area *Calophaca wolgarica* (L. Fl.) DC in connection with the choice of places for its reintroduction to the Saratov oblast // Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University. Vol. 16, Issue 4. P. 38-48. (In Russian). DOI: 10.18500/1682-1637-2018-4-38-48

Lisovsky A.A., Dudov S.V. Advantages and limitations of ecological habitat modeling methods. 2. MaxEnt // Journal of General Biology. 2020. Vol. 81, No. 2. P. 135-146. (In Russian). DOI: 10.31857/S0044459620020049

Mayevsky P.F. Flora of the middle zone of the European part of Russia. 11th ed. Moscow: KMK Scientific Press, 2014. 635 p. (In Russian).

Olonova M.V., Gudkova P.D. Bioclimatic modeling: tasks for practical work and guidelines for their implementation. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2017. 50 p. (In Russian). DOI: 10.18500/1682-1637-2018-4-38-48

Pisarenko O.Yu. The experience of applying the MaxEnt algorithm to the analysis of the distribution of moss species. Problems of Botany of South Siberia and Mongolia. 2020. No. 19-2. P. 211-214. (In Russian). DOI: 10.14258/pbssm.2020105

Flora of the USSR. Vol. 26 / ed. V.L. Komarov, B.K. Shishkin, E.G. Bobrov. 1961. Moscow; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961. 919 p. (In Russian).

Flora of the European part of the USSR. Vol. VII. Rep. ed. and ed. volumes N.N. Tsvelev. 1994. St. Petersburg: Nauka, 1994. 317 p. (In Russian).

DIVA-GIS. 2021. URL: <http://www.diva-gis.org/> (date of application: 17.05.2022).

Dormann C. F., Elith J., Bacher S., Buchmann C., Carl G., Carré G., García Marquéz J. R., Gruber B., Lafourcade B., Leitão P. J., Münkemüller T., McClean C., Osborne P. E., Reineking B., Schröder B., Skidmore A. K., Zurell D., Lautenbach S. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance // Ecography. 2013. Vol. 36. P. 27-46. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x

Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudík M., Yung En Chee, Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists // Diversity and Distributions. 2011. Vol. 17, Issue 1. P. 43-57. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x> (date of application: 17.05.2022).

GBIF: the Global Biodiversity Information Facility. 2021. URL: <https://www.gbif.org/> (date of application: 17.05.2022).

Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal Climatology. 2005. Vol. 25. P. 1965-1978. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1276> (date of application: 17.05.2022).

Phillips S.J., Dudík M. Modeling of Species Distributions with MaxEnt // New Extensions and a Comprehensive Evaluation. Ecography. 2008. Vol. 31. P. 161-175. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x> (date of application: 17.05.2022).

Phillips S.J., Anderson R.P., Dudík M., Schapire R.E., Blair M.E. Opening the black box: an open-source release of Maxent // Ecography. 2017. Vol. 40. P. 887-893. URL: <https://doi.org/10.1111/ecog.03049> (date of application: 17.05.2022).

WCVP: World Checklist of Vascular Plants. 2021. URL: <https://wcvp.science.kew.org/> (date of application: 17.05.2022).

WorldClim: Global climate and weather data. 2021. <https://www.worldclim.org/> (date of application: 17.05.2022).

POTENTIAL BIOCLIMATIC AREA OF *TANACETUM KITTARYANUM* (C.A. MEY.) TZVELEV

Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov (Russia)

© 2022 E.A. Arkhipova, M.V. Stepanov, R.R. Fetkullina

Annotation. An attempt was made to model the bioclimatic range *Tanacetum kittaryanum* (C.A. Mey.) Tzvelev s. l. by maximum entropy based on herbarium funds of the Saratov State University (SARAT) and the GBIF database. The greatest contribution to the construction of the model was made by the seasonality of temperature, the precipitation of the dry month, the seasonality of precipitation.

Key words: *Tanacetum kittaryanum*, maxent modeling, bioclimatic parameters.