

Сабденова Айдана Артурзиньокызы

магистрант

Казахский национальный

университет им. аль-Фараби

г. Алматы, Республика Казахстан

Ахметов Хамит Агабекович

канд. биол. наук, заместитель директора

ГНПП «Колсай колдери»

г. Алматы, Республика Казахстан

Грачев Юрий Александрович

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник

РГП «Институт зоологии» КН МОН РК

г. Алматы, Республика Казахстан

Грачев Алексей Александрович

магистр биол. наук, старший научный сотрудник

РГП «Институт зоологии» КН МОН РК

г. Алматы, Республика Казахстан

Есжанов Бирликбай Есжанович

канд. биол. наук, доцент, профессор

Казахский национальный

университет им. аль-Фараби

г. Алматы, Республика Казахстан

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ MAXENT ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ
МАРАЛА *CERVUS ELAPHUS SIBIRICUS* НА ТЕРРИТОРИИ
НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «КОЛСАЙ КОЛДЕРИ»**

Аннотация: в статье рассматривается использование метода моделирования Maxent для подвида благородного оленя, марала (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) на территории национального парка «Колсай колдери» и всего

Казахстана. Модель строилась на основании данных за 2011–2014 гг., собранных во время учетов животных на конных маршрутах. Для анализа распределения были использованы климатические и почвенные факторы, а также данные о растительном покрове региона. Основным результатом работы являются карты пространственного распределения вида для двух опытных территорий. Анализ степени влияния отдельных факторов на это распределение выявил наиболее важные факторы, различные для двух опытных территорий. Установлено, что на распределение марала на территории национального парка большее влияние оказывают почвенные факторы, для территории Казахстана – климатические.

Ключевые слова: марал, *Cervus elaphus sibiricus*, компьютерное моделирование, Maxent.

Развитие современных компьютерных технологий обуславливает все большую их интеграцию в различные сферы общественной жизни, в том числе – и науки. Пример таких технологий – это метод компьютерного моделирования Maxent, успешно используемый для решения разнообразных узкоспециализированных задач. Maxent анализирует уровень энтропии переменных, при этом ключевое значение придается элементу с максимальной энтропией.

В популяционной биологии Maxent применяется для создания пространственных моделей распределения вида на заданной территории [11; 15]. Его использование позволяет создать модель распределения популяции на основании небольших данных о встречах животного (presence only data), а также проанализировать влияние ряда факторов окружающей среды на это распределение [11].

Марал (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) – самый крупный представитель благородных оленей в Евразии [7; 8], ценный промысловый зверь. Марал имеет большое хозяйственное значение как для медицины: в лекарственных целях используются панты, сухожилия и пр [8], так и для охотничьей деятельности [1]. Марал является важным элементом лесостепных экосистем [1; 2], численность его популяций – один из лимитирующих факторов для хищников региона

(волк, снежный барс). Исчерпывающие данные о его распространении в Казахстане являются устаревшими [1; 6], в то время как свежие данные являются неполными [9]. Марал является фоновым видом копытных Национального парка «Көлсай көлдері».

Природные условия национального парка обусловлены горным рельефом – вдоль южной границы парка проходит хребет Кунгей Алатау. Севернее хребта протекает река Чилик с многочисленными горными притоками. Климатические условия и биологическое разнообразие региона подчинено вертикальной поясности. Среднегорный пояс характеризуется умеренным климатом, климат высокогорья более суров, также характерно образование температурных инверсий. Вегетационный период длится в среднем 4–5 месяцев, продолжительность залегания снега в предгорьях составляет в среднем 5 месяцев, увеличиваясь с высотой. На территории парка представлены преимущественно горные и интразональные экосистемы.

Применение компьютерного моделирования представляется весьма перспективным методом, так как позволит построить актуальную картину распространения марала в Казахстане без необходимости дополнительных полевых исследований, осуществление которых в горной местности может быть связано с различными затруднениями [3]. Цель данной работы – создать модель пространственного распределения марала *Cervus elaphus sibiricus* на территории национального парка «Көлсай көлдері». Метод Maxent ранее не применялся для данного объекта и данной территории.

Материалы и методы исследования

Данные о встречах *Cervus elaphus sibiricus* на территории Национального парка «Көлсай көлдері» с 2011 по 2014 гг. были предоставлены научным отделом парка. Учет животных производился на конных маршрутах, на основании данных о встречах была создана карта животного мира. Она послужила источником для получения 14 точек встреч марала с установленными географическими координатами.

Для применения Maxent также необходимы данные о внешних условиях. Подбор факторов окружающей среды проводился на основе литературных данных [4; 9]. Были использованы следующие факторы:

- BIO1 – средняя годовая температура;
- BIO7 – средняя разница температур (макс. температура самого теплого месяца – мин. температура самого холодного месяца);
- BIO12 – годовое количество осадков;
- alt – высота над уровнем моря;
- clay – содержание глины в почве, массовая доля в %;
- solntz – прогнозируемая вероятность появления (0–100%) для класса солонцов;
- lcover – растительный покров.

Факторы BIO1, BIO7, BIO12 и alt получены из данных WorldClim [13], факторы clay и solntz – из данных ISRIC SoilGrids [12], а lcover – из данных GlobCover [10].

Территория национального парка была рассмотрена полностью, частично вместе с граничащей территорией Кыргызстана. Кроме того, для вторичного анализа была задана территория всего Казахстана.

В настройках Maxent были указаны следующие характеристики:

- random test points = 25 (% тестовых данных для проверки созданной модели);
- replicates = 10 (количество прогонов программы);
- replicate type = subsample (тип повторений);
- maximum iterations = 5000 (показатель максимальных повторений).

Результаты исследования и их обсуждение

Основным результатом работы Maxent является карта распределения вида на заданной территории, модели для Национального парка – модель 1 (рис. 1) и всего Казахстана – модель 2 (рис. 2), соответственно, представлены ниже. Вероятность встречи марала оценивается по шкале, где 0 – минимальная степень, а 1 – максимальная.

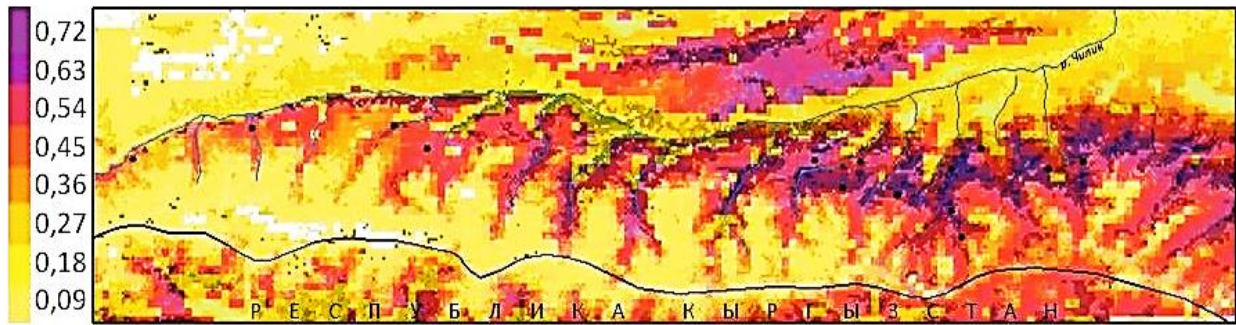


Рис. 1. Пространственное распределение марала *C.e.sibiricus* в ГНПП «Көлсай көлдері» и прилегающей территории

В данных условиях максимальная вероятность встречи модели 1 равна 0,72. Звездочкой (*) отмечены 14 точек встречи, взятые за основу модели.

На основании карты можно судить о том, что наибольшее распространение марала отмечено в долинах рек, а наименьшее – в высокогорьях. Однако необходимо учитывать, что представленная модель строилась на усредненных годовых данных, и отражает среднегодовую картину пространственного распределения.

На территории Казахстана прогнозируемыми местообитаниями марала являются регионы юго-восточного и восточного Казахстана. Распределение по территории Казахстана в целом совпадает с литературными данными об ареале обитания марала [1; 5; 6; 14]. Из этого можно делать вывод о том, что даже небольшого количества исходных данных (в данном случае, 14 точек) достаточно для построения правдоподобной модели.

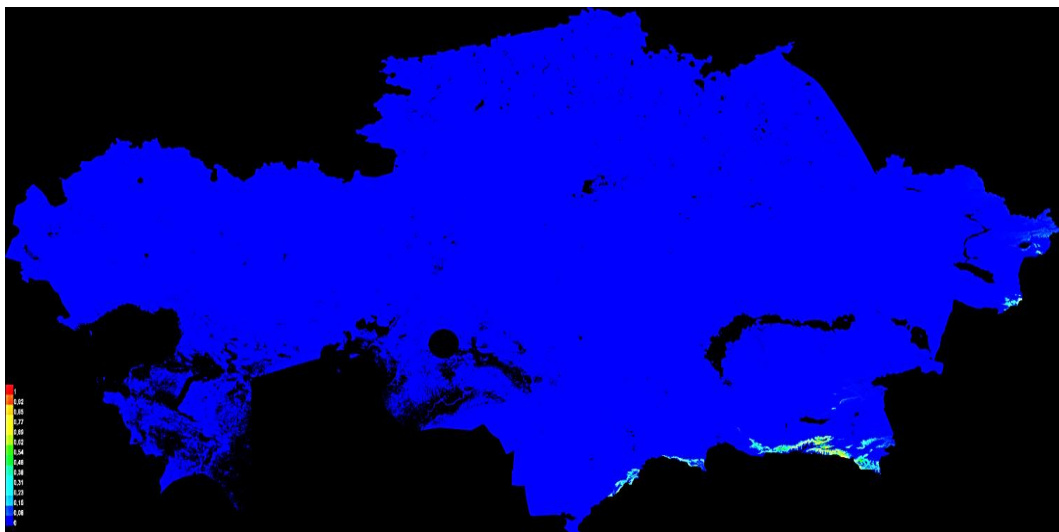


Рис. 2. Пространственное распределение марала *C.e.sibiricus* на территории Казахстана

О достоверности построенной модели можно судить по показателям AUC (Area Under the Receiver Operating Characteristic – площадь под рабочей характеристикой приемника) [15]. Показатель AUC идеальной модели равен 1, однако с поправкой на presence only data, показатель AUC хорошей модели стремится к 1. Для модели 1 $AUC = 0,818 \pm 0,099$, для модели 2 $AUC = 0,998 \pm 0,001$. Такие значения говорят о высокой достоверности построенных моделей.

Анализ значимости факторов окружающей среды или «переменных» на пространственное распределение вида проводится двумя способами: основной алгоритм, определяющий процентный вклад каждой переменной в общую картину распределения вида, и jackknife-тест («складной нож»). Основной алгоритм также позволяет определить «значимость изменения» (permutation importance), меняя значения каждой отдельной переменной и фиксируя степень изменения общей модели от этого. Значения важности переменных, полученные для моделей 1 и 2, показаны в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Анализ вклада переменных модели 1

<i>Переменная</i>	<i>Процентный вклад</i>	<i>Значимость изменения</i>
bio1	50	44.2
solntz	41.9	46
clay	5.8	1.5
lcover	1.6	5.9
bio7	0.6	2.4
alt	0	0.1
bio12	0	0

Таблица 2

Анализ вклада переменных модели 2

<i>Переменная</i>	<i>Процентный вклад</i>	<i>Значимость изменения</i>
alt	44.1	0
bio7	23.8	90.9
bio1	23.3	8
bio12	4	0.2
solntz	3.7	0.9
clay	0.6	0
lcover	0.5	0

Список наиболее значимых переменных для моделей 1 и 2 различается. Для модели 1 ключевыми факторами являются средняя годовая температура, наличие солонцов и глиняных фракций почвы, при этом высота над уровнем моря и годовое количество осадков не вносят вклад в пространственное распределение объекта. Показатели значимости изменения относительно хорошо коррелируют с процентным вкладом факторов, однако отмечается наибольшее значение у наличия солонцов, а растительный покров является третьим по важности.

Для модели 2 главными определяющими факторами среды являются: высота над уровнем моря, средняя разница температур и средняя годовая температура, тогда как анализ значимости изменения выделяет, в первую очередь, среднюю разницу температур, а затем – среднюю годовую температуру и наличие солонцов.

Можно сделать вывод, что факторы окружающей среды имеют разное влияние на распространение марала в зависимости от масштаба рассмотрения: то, что играет ключевую роль на биотопном, внутриэкосистемном уровне, теряет значимость на межэкосистемном, биосферном уровне. Так, характеристики почв (наличие солонцов и глиняных фракций) имеют большое влияние на распределение животных внутри ареала обитания, а рельефно-климатические факторы (температуры и высота) приобретают большее значение при большом разнообразии внешних условий. Стоит отметить, что средняя годовая температура является важным фактором в обоих случаях.

Второй метод анализа вклада переменных – jackknife-тест – работает следующим образом: каждая переменная по очереди исключается и создается с модель без нее (голубая графа); затем модель создаётся только с этой переменной (синяя графа); дополнительно создаётся модель со всеми переменными вместе (красная графа). Указаны средние значения на основании 10 повторов прогона программы (рис. 3). В целом результаты этого теста совпадают с результатами основного теста:

1. Для модели 1 факторы среды с самым высоким коэффициентом при использовании в изоляции – средняя годовая температура и наличие солонцов. Они

также являются переменными, сильнее всего снижающими эффективность, когда отсутствует в прогнозе, и, следовательно, содержат важную информацию, отсутствующую в других переменных. Результаты прогона тестовых данных практически полностью коррелируют с тестом тренировочных данных. Применение AUC для тестовых данных дало немного другие результаты: наибольшее значение «в одиночку» дает фактор присутствия глины в почве.

2. Для модели 2 фактор среды с самым высоким коэффициентом при использовании только – высота над уровнем моря. Средняя годовая температура является переменной, сильнее всего снижающими эффективность, когда отсутствует в прогнозе. Аналогично все обстоит с прогоном тестовых данных и применением к ним AUC.

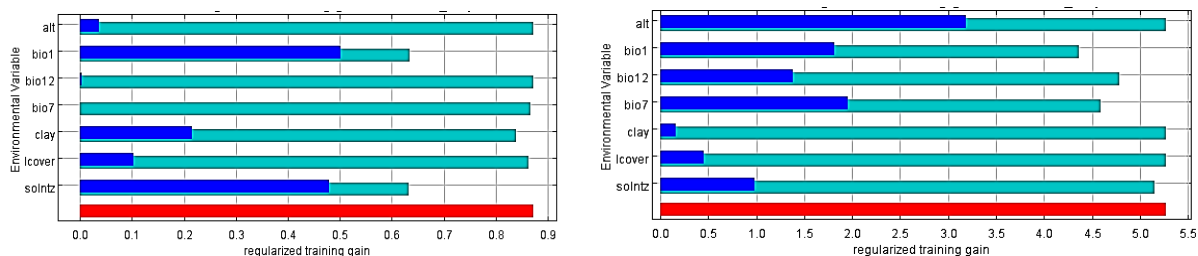


Рис. 3. Jackknife-тест тренировочных данных для модели 1 (слева) и модели 2 (справа)

Заключение

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Maxent является высокоэффективным и точным методом для компьютерного моделирования распространения популяций, при этом достаточно достоверная модель может быть создана даже на базе ограниченных данных presence only.

2. Пространственное распределение марала на территории Казахстана остается стабильным, и почти полностью совпадает с зафиксированными ранее.

3. Значимость различных факторов среды зависит от масштаба рассмотрения. В масштабах Казахстана наибольшее влияние на распределение марала оказывают рельефно-климатические условия, такие как высота над уровнем моря и средняя годовая температура. В масштабах Национального парка (Алматинская

область) первостепенное значение имеют почвенные характеристики (наличие солонцов и содержание глиняной фракции), а также средняя годовая температура.

Данная работа может быть рассмотрена как пример эффективного применения Maxent для животных на территории Казахстана. Программа зарекомендовала себя как удобный инструмент, который можно использовать для многих других целей: предсказания распространения вида в будущем (необходимы прогнозируемые характеристики окружающей среды), определения влияния на распространение других видов (конкурентов и хищников), выявления наиболее перспективных участков для полевых наблюдений за животными, охраны, охоты, а также туризма. Однако, необходимо отметить, что поученная модель не отражает действительного распространения, а лишь прогнозирует его в максимально благоприятных условиях среды. Метод компьютерного моделирования должен быть использован как вспомогательный инструмент, облегчающий рутинные мероприятия по учету животных и другие полевые исследования.

Выражается признательность сотрудникам ГНПП «Көлсай көлдері» и РГП «Институт зоологии» за помощь и содействие в осуществлении данной работы.

Список литературы

1. Звери Казахстана / А.В. Афанасьев [и др.]; под ред. А.В. Афанасьева. – Алматы: Изд-во АН КазССР, 1953. – 536 с.
2. Казаков А.П. Учеты численности марала (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) в республике Хакасия // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства. – 2012. – №1. – С. 533–534/
3. Калинин Ю.Н. Современное состояние численности копытных Алтайского заповедника // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2013. – Т. 22. – №4. – С. 102–107.
4. Кассал Б.Ю. Попытка реинтродукции марала *Cervus elaphus sibiricus* в Омской области // Российский Журнал Биологических Инвазий. – 2015. – №1. – С. 30–40.

5. Позвоночные животные Казахстана / А.Ф. Ковшарь [и др.]; под ред. А.Ф. Ковшаря. – Алматы: Изд-во Атамұра, 2013. – 312 с.
6. Кузнецов Б.А. Млекопитающие Казахстана. – М.: Изд-во Московского общества испытателей природы, 1948. – 228 с.
7. Майманакова И.Л. Особенности поведения маралов (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) на солонцах в условиях горно-таёжного участка «Малый Абакан» заповедника «Хакасский» // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2013. – Т. 22. – №4. – С. 49–54.
8. Смирнов М.Н. Марал (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) в Красноярском крае: распространение, ресурсы и их использование / М.Н. Смирнов, В.А. Тюрин, А.Н. Зырянов // Вестник КрасГАУ. – 2012. – №8. – С. 113–117.
9. Тюрин В.А. Марал (*Cervus elaphus sibiricus* Severtzov, 1873) в Восточном Саяне (распространение, экология, оптимизация использования): Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Тюрин Владимир Анатольевич. – Улан-Удэ: Бурятский государственный университет, 2014. – 307 с.
10. GlobCover 2009 / Arino O. et al. // ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway, 27 June – 2 July 2010.
11. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists / Elith et al. // Diversity and Distributions. – 2011. – №17. – P. 43–57.
12. SoilGrids1km – Global Soil Information Based on Automated Mapping / Hengl T. et al. // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9 (8). – e105992.
13. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas / Hijmans R.J. et al. // International Journal of Climatology. – 2005. – Vol. 25. – P. 1965–1978.
14. Molecular Phylogeography of the Red Deer (*Cervus elaphus*) Populations in Xinjiang of China: Comparison with other Asian, European, and North American Populations / Mahmut et al. // Zoological Science. – 2002. – Vol. 19 (4). – P. 485–495.
15. Phillips S.J. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling / S.J. Phillips, M. Dudik, R.E. Schapire // ICML '04 Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning. – New York, 2004. – P. 655–662.