

УДК 57.087.2:528.9:598.2

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПТИЦ В КАРТОГРАФИРОВАНИИ И МОНИТОРИНГЕ ИХ РЕСУРСОВ

В. А. Юдкин

THE EXPERIENCE OF USING THE MATHEMATICAL MODEL OF BIRDS SPATIAL DISTRIBUTION IN MAPPING AND MONITORING OF THEIR RESOURCES

V. A. Yudkin

Проанализирован опыт использования математической модели пространственного распределения птиц при создании карт размещения их ресурсов. Созданы актуальные карты крупного и мелкого масштаба и прогнозные мелкомасштабные карты. Для каждого варианта математико-картографического моделирования приведена оценка его информативности.

The paper analyzes the experience of using the mathematical model of birds spatial distribution in the process of mapping birds resources distribution. Actual large-scale maps and small-scale maps as well as predictive small-scale maps were created. Information value checking of every version of mathematical cartographic modelling is provided.

Ключевые слова: математико-картографическое моделирование, зоологическое картографирование, численность, пространственное распределение птиц, ареал, ГИС.

Keywords: mathematical cartographic modeling, zoological cartography, numbers, spatial distribution of birds, area, GIS.

Обобщение многочисленных результатов анализа обширного количественного материала по обилию птиц в разных эколого-географических условиях позволило выявить значимые для плотности вида внешние и внутренние факторы. Были подобраны функции, аппроксимирующие пространственные изменения плотности по этим факторам. Сопоставление этих результатов с фундаментальными положениями по экологии видов [11] была разработана концептуальная математическая модель пространственной неоднородности распределения птиц [7; 8]. Сущность этой модели следующая:

$$\ln N_{in} = \ln N_{int} - 0,78 \ln (0,0001 m_i) + \\ + \ln b_{in} + 20(a_{in} - 0,6)^3 + \ln w + \ln k_{1...z} \quad (1)$$

где N_{in} – плотность вида i в гнездовой период на участке n ; N_{int} – имманентная плотность вида i в год t ; m_i – средняя масса одной взрослой особи вида i (г); a_{in} – количество пригодного для вида i доступного субстрата на площади, занятой предпочитаемой топоархитектурой на участке n ; b_{in} – доля площади участка n с топоархитектурой, которую предпочитает вид i ; в число факторов $k_{1...z}$ включаются такие, как антропогенное беспокойство, влияние миграций на плотность населения, а также ряд индивидуальных, значимых лишь для определенных видов факторов; в данное уравнение на место $k_{1...z}$ обычно подставляются уже готовые произведения из множителей, нормированных по единице. Фрагмент w принимает значение верхнего или нижнего варианта уравнения (2), в зависимости от того, к северу или к югу от широтной зоны предпочтения расположен анализируемый участок:

$$w = \exp[-(x_{ci} \cdot c_{ni} + x_{di} \cdot d_{ni}) \sqrt{c_{ni}^2 + d_{ni}^2} / (c_{ni} + d_{ni})]^{rsi} \\ \text{или } w = \exp\{-(x_{ci} \cdot c_{ni})^{rci} + (x_{di} \cdot d_{ni})^{rdi}\} \quad (2)$$

где c_{ni} – отклонение широтно-климатических условий в выделе n от их интервала, предпочитаемого видом i ; d_{ni} – удаленность выдела n от долготного сектора предпочтения вида i ; коэффициенты x_{ci} и x_{di} и показатели степени r_{ci} и r_{di} принимают специфические для вида i значения в уравнениях, характеризующих изменение обилия по широтно-климатическому градиенту и по долготе соответственно.

Различные варианты графического решения этой системы уравнений подробно представлены в специальной монографии [8]. При этом наиболее информативным с точки зрения визуализации оказалось картографическое представление решения этой системы уравнений.

В системе уравнений (1) можно выделить 2 составляющие: крупномасштабную (экологическую) и мелкомасштабную (географическую). Первая представляет собой часть уравнения, моделирующего изменения плотности вида от внутренних и внешних факторов при незначимом влиянии географического положения. Его сущность представлена частью уравнения (1) без компоненты w и подробно изложена в специальной статье [6]. Эта часть модели отражает концептуальные представления о пространственной неоднородности распределения вида на пространстве, где широтно-климатическими и долготными закономерностями можно пренебречь. В частности, из этой части уравнения (1) видно, что обилие вида на определенном участке в какой-либо конкретный год определяется, с одной стороны, общей численностью подвидов (или географической популяции) в данный год, а с другой стороны, величиной площади, пригодной для его обитания, ее емкостью и размещением в пространстве. Общая численность популяции определяется не только внешними, но и внутривидовыми факторами и может существенно различаться по годам. То, как отражается на плотности абсолютная численность популяции в определенный год, выражено через её имманентную плотность в изучаемом рай-

оне (N_{int}). Величина пригодной для обитания площади на определенном участке и ее емкость в данном случае характеризуется параметрами a_{in} и b_{in} .

Эта часть концептуальной модели положена в основу функционирования специальной географической информационной системы, созданной для мониторинга орнитологической обстановки в зоне ответственности аэропорта, площадь которой невелика (1100 км²). Мониторинг орнитологической обстановки основан на создании ежегодной серии карт, отображающих численность самолетоопасных видов птиц и характер ее распределения в данной зоне [4]. Все карты строятся на базе единого деления картируемой территории на наименьшие единицы рассмотрения, то есть базовой картой является грид-карта [2]. На ней в качестве наименьших единиц приняты градусные поля, каждая из сторон которых близка к 2 км. Отдельно для каждого такого градусного поля с использованием математической модели рассчитывается плотность каждого самолетоопасного вида для конкретного года. При этом количественная информация о проявлениях факторов, относящихся к группам a_{in} и b_{in} в каждый конкретный год, считается с материалов дистанционного зондирования Земли.

Для определения N_{int} (имманентной плотности) каждого из видов в данном районе в каждый конкретный год закладывается не менее 10 учетных трансектов. На этих трансектах проводятся выборочные учеты птиц. Учетные трансекты размещаются на картируемой территории таким образом, чтобы действительно обследовать все разнообразие условий обитания изучаемых птиц. Величина N_{int} для прогнозных расчетов получена как средняя арифметическая этих величин на каждом учетном трансекте, где b_{in} составляет более 0,1, а a_{in} попадает в интервал 0,5 – 0,7.

В результате модельных расчетов для каждого вида получаем показатель плотности в каждом градусном поле. Таким образом, на векторной грид-карте объектами являются наименьшие единицы рассмотрения (градусные поля), а в атрибутивной таблице каждому виду соответствует колонка с количественной характеристикой его плотности. На этой основе строятся отдельные тематические карты распределения плотности каждого вида. Эта характеристика отображается способом картограммы. Легенда такой карты выполняется интервальным способом. Данная карта не только иллюстрирует характер пространственной неоднородности плотности вида, на ее основе можно корректно рассчитать величину численности на данной площади. Такие карты строятся для каждого временного среза, в результате чего получаются временные серии карт. На рис. 1 показана серия карт распределения *Corvus frugilegus*. Сравнение карт показало, что максимальная численность вида была в 2008 г., а после 2008 г. распределение несколько изменилось: заметно возросла плотность в северной части 15-ти километроввой зоны.

Оценка информативности этой части модели проводилась в рамках мониторинга в 15-ти километровой зоне аэропорта «Толмачёво» в 2001, 2003 и в 2004 гг. Она выполнена путем сравнения модельных и эмпирических рядов показателей плотности. Для этого предварительно моделировались показатели гнездовой

плотности в 11 выделах, в которых впоследствии проводились выборочные учеты птиц. При моделировании расчет по данному уравнению проведен без участия множителя N_{int} , поскольку его величина бывает еще не определена до начала учетных работ. После проведения выборочных учетов оценено сходство модели с полученными результатами. Для такой оценки по каждому виду был рассчитан коэффициент корреляции модельных значений обилия и эмпирических. Средняя арифметическая коэффициентов корреляции для всех учетных видов на 11 маршрутах составила 0,65. Средняя взвешенная (чем выше сумма всех показателей обилия вида, тем больше вклад его коэффициента корреляции в среднюю) коэффициентов корреляции составила 0,81. При этом отчетливо просматривается тенденция: чем заметнее вид и чем он многочисленнее (а, следовательно, надежнее эмпирическая оценка его обилия), тем выше коэффициент корреляции. После приведения нормированных модельных коэффициентов к традиционной размерности обилия (умножением на имманентную плотность) они снимают 65,6 % дисперсии показателей эмпирических значений.

Часть концептуальной модели, представленная системой уравнений (2), описывает основные географические закономерности распределения вида. Вариант картографического отображения результата решения этой системы уравнений показан на рис. 2. Характеристика основных географических трендов плотностного потенциала вида, иллюстрируемая данной картограммой, получила название градиентного ареала. При отображении способом изолиний определенных уровней имманентной плотности установлено, что для каждого вида, входящего в тот таксон эколого-географической классификации, для которого строится модель, обнаруживается одна изолиния, наиболее близко располагающаяся на карте от границ его гнездового ареала в традиционных ареалогических представлениях (рис. 3). При этом замечено, чем выше численность вида, тем с меньшим значением плотности изолиния описывает его известный гнездовой ареал наиболее полно.

Информативность моделирования границ ареалов оценивалась для каждого подвида (или вида) следующим образом. Из графической модели градиентного ареала отбирался контур, ограниченный той изолинией, при которой он наиболее близок к известным границам области гнездового распространения этого вида или подвида. Выбранная модельная область накладывалась на известную область гнездового распространения. Рассчитывалась площадь зоны совпадения этих двух областей. На основе этих данных посредством коэффициента общности Жаккара [12] рассчитывалась степень совпадения модельной и эмпирической областей распространения каждого подвида или вида. Средняя арифметическая всех коэффициентов общности составила $60,5 \pm 3,6$ % (при 95 % уровне значимости). Таким образом, данная математико-картографическая модель может быть весьма информативной и для описания традиционных представлений о гнездовом распространении птиц.

Сравнительно высокая информативность моделирования и наличие зависимости результатов не только

от внешних факторов, но и от общей численности вида, позволяют смоделировать возможные изменения границ гнездовых ареалов перелетных птиц. Исходя из концепции, на которой основана предлагаемая модель, наиболее существенными причинами таких изменений могут быть следующие: изменение общей численности вида (чаще всего из-за изменений емкости уже имеющихся зимовок), изменения положения зимовочных ареалов, глобальные изменения климата. Так, общее уменьшение численности вида (при прочих равных) должно в перспективе привести к постепенному сужению гнездового ареала, которое на карте будет проходить пропорционально пространственным градиентам имманентной плотности, отображенным градиентным ареалом (рис. 2 и 3). В наиболее простой форме, границы сужающегося ареала можно поэтапно обозначить последовательностью изолиний в порядке возрастания их значения плотности. На рис. 4 показаны 3 этапа возможного изменения ареала *Oxygus augeola* (вплоть до появления дизъюнкции), если современное уменьшение численности вида будет иметь долгосрочный характер. При увеличении численности, напротив, ареал вида в представлениях исследователей будет расширяться в обратном направлении: на каждом отдельном этапе расширения его границы могут быть описаны изолинией с меньшим, чем предыдущая, значением плотности.

Изменения зимовочных ареалов приведут к изменениям долготных границ сектора предпочтения [5]. Соответственно в эту же сторону сместятся и изолинии с определенными значениями плотности. При этом масштабы такого смещения для каждого интер-

вала долготы и широты будут уникальными из-за сложной конфигурации градиента широтно-климатических параметров.

Выше изложен опыт использования лишь отдельных фрагментов концептуальной модели для построения карт. Полностью вся модель задействована при составлении карт распределения семи охотничьих птиц на территории Западно-Сибирской равнины (*Anas platyrhynchos*, *A. acuta*, *A. querquedula*, *Clangula hyemalis*, *Lagopus lagopus*, *Lygurus tetrix*, *Tetrastes bonasia*). Оптимальный масштаб этих карт составляет 1:10 000 000. Учитывая чрезвычайную сложность явления – пространственной неоднородности плотности вида – для его характеристики на карте отображаются 3 параметра: тип распределения, актуальная плотность вида и его плотностный потенциал. Для карты используются представления о распределении трех типов: сплошное, пятнистое и спорадичное [3]. Под сплошным понимается распределение, при котором вид обнаружится более, чем на трети участков, площадью 5 км², при условии случайного выбора таких участков в пределах изображенного на карте контура. Пятнистое распределение предполагает закономерное чередование таких по величине участков, заселенных видом, с 5 – 10 участками, где вид не обнаружится (также при случайном выборе таких участков в пределах обозначенных контуров). Спорадичное распределение характеризуется тем, что на подавляющей части площади вид, как правило, не встречается, но вероятность, хоть и незначительная, встретить отдельных особей или локальные группировки все же существует.

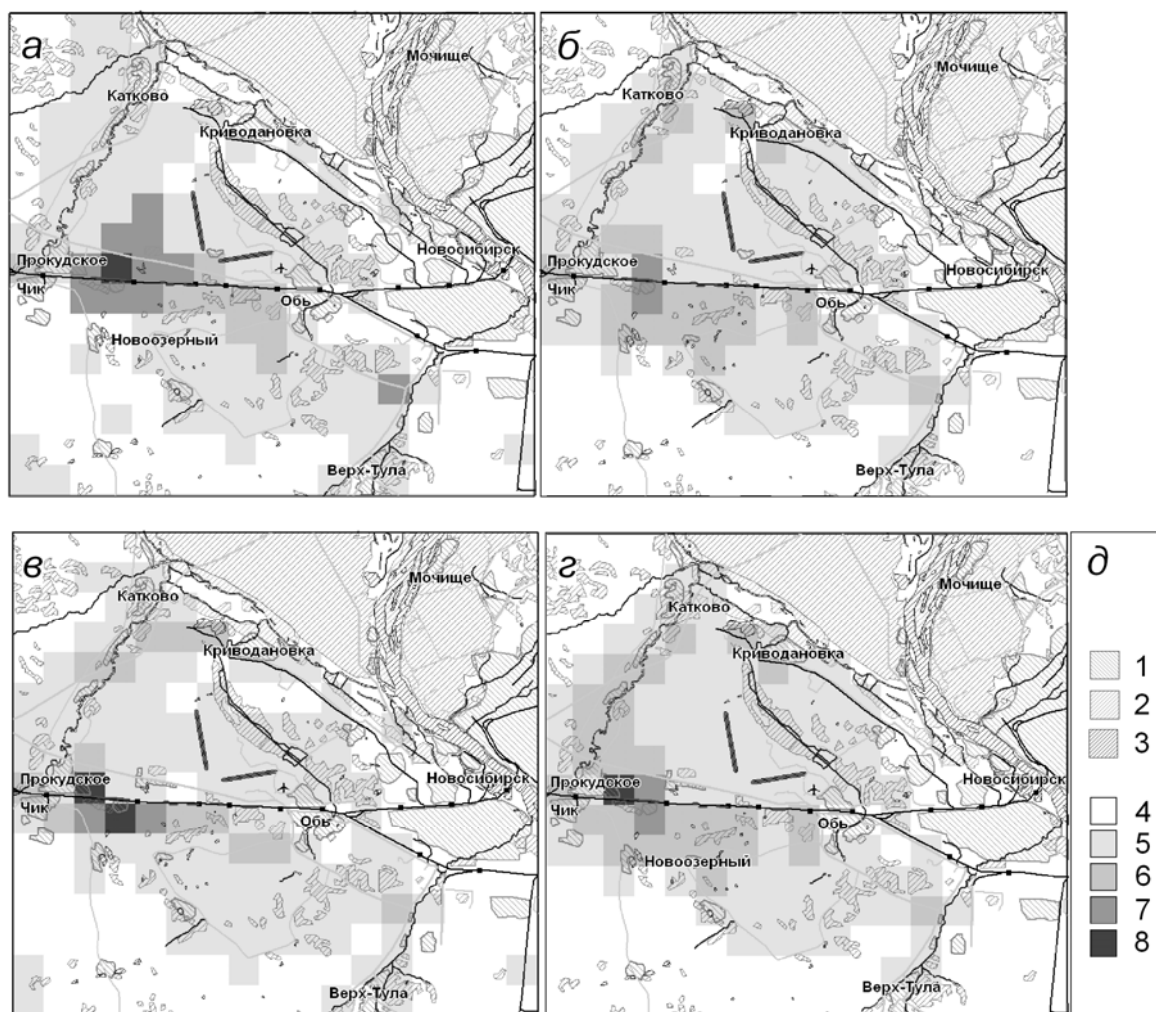


Рис. 1. Серия векторных крупномасштабных карт распределения *Corvus frugilegus* в различные годы в 15-ти километровой зоне аэропорта: а – 2008 г., б – 2009 г., в – 2010 г., з – 2011 г.; д – условные обозначения. 1 – населенные пункты, 2 – древесная и кустарниковая растительность, 3 – водные поверхности; плотность (особей / км²): 4 – 0-1, 5 – 1-10, 6 – 10-20, 7 – 20-50, 8 – более 50

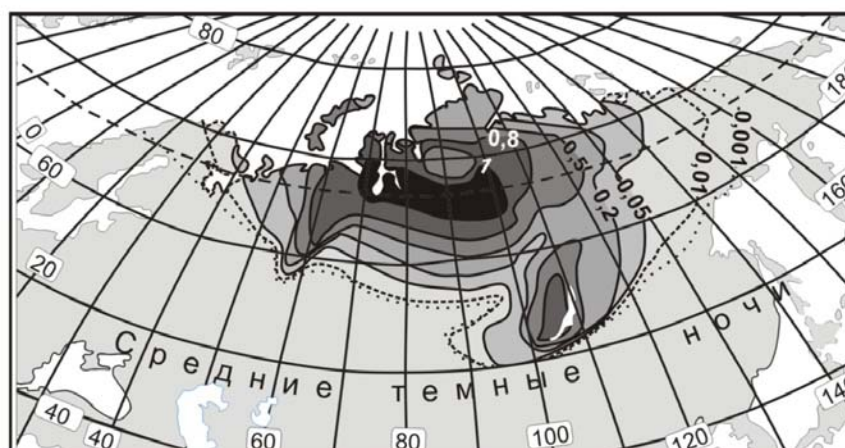


Рис. 2. Пример визуализации результата решения системы уравнений (2), график построен в географической системе координат

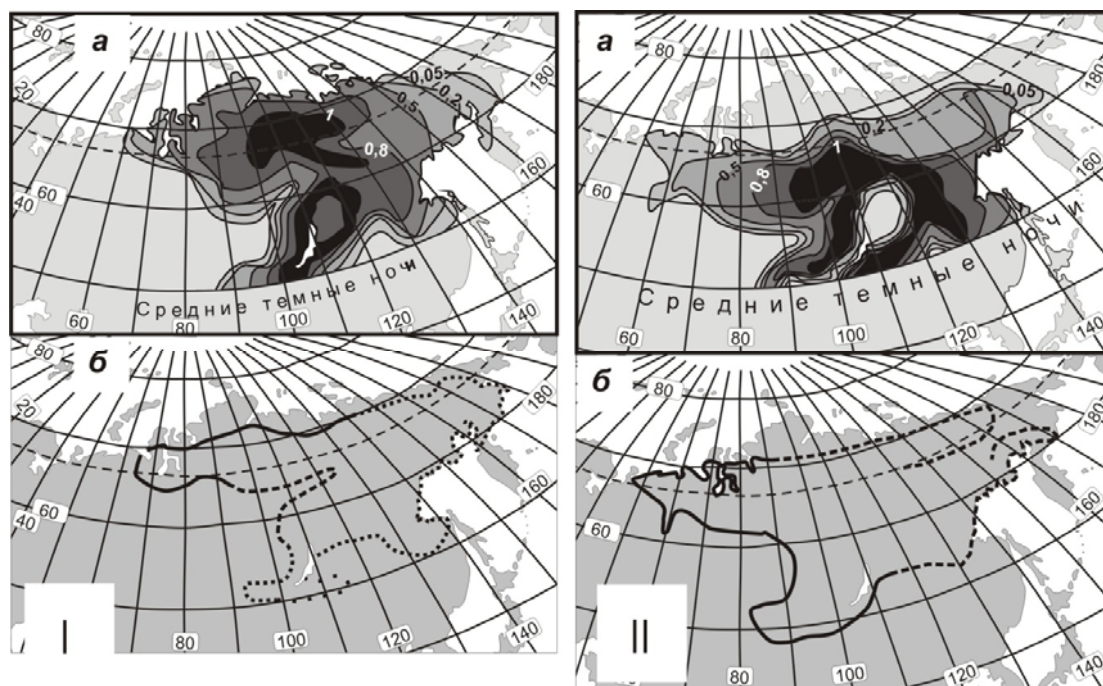


Рис. 3. Математико-картографическое моделирование границ гнездовых ареалов *Schoeniclus pallasi* (I); – *Gallinago stenura* (II) на основе системы уравнений (2) по изолинии 0,05 (а) и традиционные представления о гнездовом распространении этих видов (б)

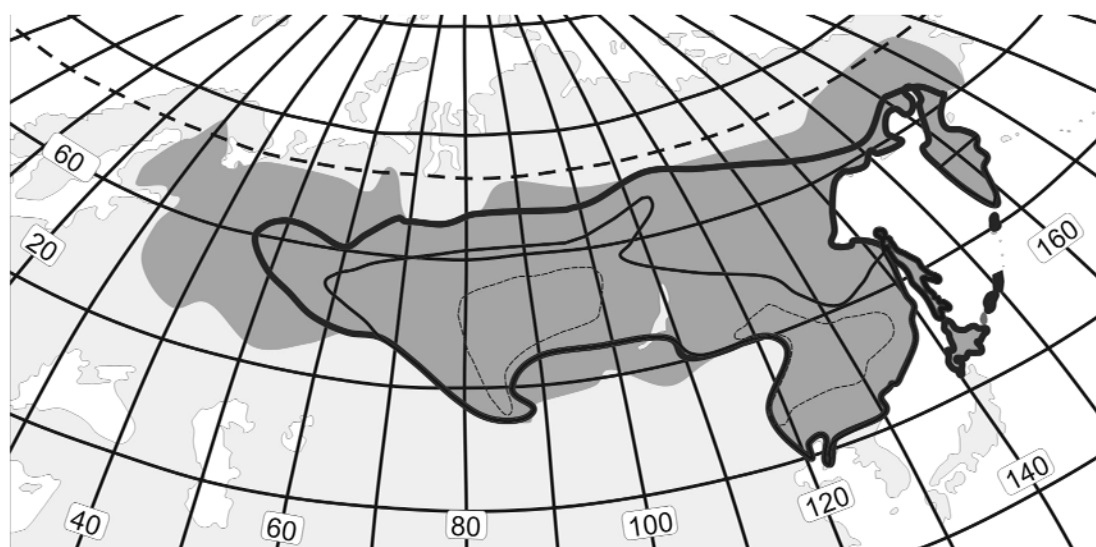


Рис. 4. Математико-картографическая модель возможных изменений в представлениях о гнездовом распространении *Ocyris aureola* в связи с общим долгосрочным сокращением его численности (сплошная заливка – ареал в конце XX столетия, каждому последующему этапу изменений соответствует все более тонкая линия границы ареала)

Первые два типа отображаются способом картограммы. Первый из этих типов на рис. 5 обозначен штриховкой с наклоном сверху вправо вниз, второй – с обратным наклоном. Приведенные для них плотностные характеристики, которые представлены в виде доверительных интервалов при 95 % уровне значимости, являются результатом расчета по всем имеющим-

ся эмпирическим данным, подпадающим под соответствующие типы распределения. Доверительный интервал в данном случае является и статистической характеристикой репрезентативности модельных значений плотности вида. Третий тип – спорадическое распределение, отображен способом качественного фона. Ему удобнее задавать белый цвет.

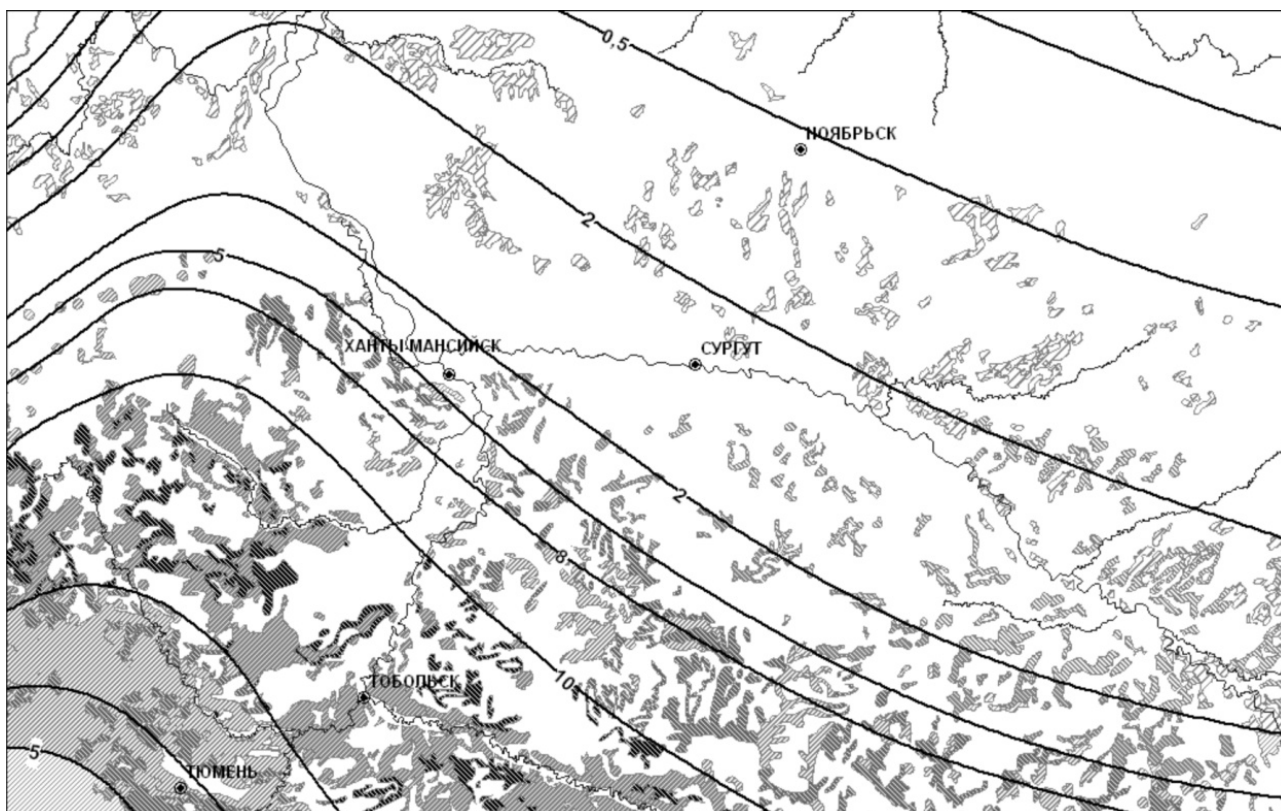


Рис. 5. Фрагмент мелкомасштабной карты «Гнездовая плотность *Lyrurus tetrix* на Западно-Сибирской Равнине»

Основные пространственные тенденции плотностного потенциала вида обозначены способом изолиний. Числа, изображенные на линиях, означают возможность максимального обилия на самых благоприятных участках (независимо от типа распределения). Все количественные характеристики на картах приводятся из расчета на условный квадрат площадью 5 км^2 . Количественные характеристики показанных контуров рассчитывались отдельно для каждой широтно-климатической зоны, ограниченной показанной изолинией. Для каждой такой зоны рассчитывался свой доверительный интервал плотности.

Информация о проявлении экологических крупномасштабных факторов (параметрах a_{in} и b_{in} уравнения (1)) считывалась с космических снимков. Эта информация синтезировалась из данных, полученных по отдельным спектральным каналам, снимкам, сделанным в разные фенологические периоды и с разным разрешением. В частности, информация о двух из наиболее значимых факторов – увлажненности и обводненности – получена со снимков разрешения 250 м, сделанных в июле по каналу 0,7 – 0,9 мкм (Terra-Modis). Данные о лесопокрытой площади, о характере сочетания участков, занятых древостоями, с открытыми пространствами, а также о значительных площадях с обширными тростниковыми займищами и зарослями кустарников, получены с космических снимков такого же разрешения, но сделанных в ноябре и декабре. Более детальный анализ отдельных участков Западно-Сибирской равнины выполнен по снимкам Landsat разрешением 10 – 15 м, снятым в те

же фенологические периоды. Данные о проявлении широтно-климатического фактора заимствованы из Климатического атласа СССР [1].

Для каждого типа распределения внутри определенной широтно-климатической зоны на основе эмпирических выборочных данных рассчитаны показатели плотности. В качестве выборочных эмпирических данных использованы результаты учетов птиц, проведенных в 1020 территориальных выделах в разные годы в разных районах Равнины [9; 10].

Легенда этих карт представима в виде трех шкал. Первая, идеализированная, дается для характеристики плотностного потенциала. Две другие, для характеристики плотности при сплошном и пятнистом типах распределения. Интервалы этих двух шкал основаны на расчетах доверительных интервалов эмпирических данных, полученных на пространствах, подпадающих под характеристики данного типа распределения.

Оценка информативности данной математико-картографической модели выполнена с помощью прогноза плотности этих семи видов на 171 ранее обследованный выдел (эти эмпирические данные приведены в приложении монографии [8]). По каждому виду отдельно смоделированный ряд показателей плотности сопоставлялся с эмпирическим. Средняя коэффициентов корреляции составила $0,42 \pm 0,14$.

Литература

1. Климатический атлас СССР. М.: ГУГК, 1960.
2. Косарева А. М. Применение метода равновеликих трапеций для создания зоологических // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2014. № 1. С. 70 – 73.
3. Пианка Э. Эволюционная экология / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 400 с.
4. Юдкин В. А. Картографирование распределения птиц для мониторинга их ресурсов // Картографическое и геоинформационное обеспечение управления региональным развитием: материалы VII научной конференции по тематической картографии (Иркутск, 20 – 22 ноября 2002 г.). Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2002б. С. 261 – 265.
5. Юдкин В. А. Математико-картографическое моделирование временных изменений гнездового распространения птиц // Тематическое картографирование для создания инфраструктур пространственных данных: материалы IX научной конференции по тематической картографии (Иркутск, 9 – 12 ноября 2010 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2010. Т. 1. С. 76 – 79.
6. Юдкин В. А. Опыт математико-картографического моделирования распределения птиц // Вычислительные технологии. Т. 12. Специальный выпуск 1. 2007. С. 153 – 167.
7. Юдкин В. А. Организация пространственного распределения птиц в репродуктивный период. Новосибирск: Издательство СО РАН, Филиал «Гео», 2000. 105 с.
8. Юдкин В. А. Экологические аспекты географии птиц Северной Евразии. Новосибирск: Наука, 2009. 408 с.
9. Юдкин В. А., Равкин Ю. С., Вартапетов Л. Г. [и др.]. Карта «Население охотничьих птиц Западно-Сибирской равнины», принципы построения и общая характеристика // Развитие современной орнитологии в Северной Евразии: труды XII Международной орнитологической конференции Северной Евразии (Ставрополь, 31 января – 5 февраля 2006 г.). Ставрополь: Изд-во СГУ, 2006. С. 297 – 298.
10. Юдкин В. А., Равкин Ю. С., Вартапетов Л. Г. [и др.]. Классификация позднелетнего населения охотничьих птиц Западно-Сибирской // Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов: материалы VIII Международной конференции (Горно-Алтайск, 19 – 23 сентября 2007 г.). Т. II. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2007. С. 231 – 235.
11. Hutchinson G. F. The niche: a abstractly inhibited hypervolume // The Ecological theatre and the Evolutionary play. New Haven Conn.: Yale University Press, 1965. P. 26 – 78.
12. Jaccard P. Lois de distribution florale dans la zone alpine // Bull. Soc. Vaund. Sci. Nat. 1902. Vol. 38. P. 69 – 130.

Информация об авторе:

Юдкин Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ИСиЭЖ СО РАН, профессор кафедры общей биологии и экологии НГУ, yudkin_v@mail.ru.

Vladimir A. Yudkin – Doctor of Biology, Leading Research Associate at the Institute of Systematic and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor at the Department of General Biology and Ecology, Novosibirsk State University.

Статья поступила в редколлегию 06.02.2015 г.