

ОПЫТ МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПТИЦ

В. А. ЮДКИН

Институт систематики и экологии животных СО РАН,

Новосибирск, Россия

e-mail: yudkin_v@mail.ru

An unusual method of birds distribution modelling is proposed. It is based on a number of conceptual models, which describe influence of environment factors on bird's density. The process of modelling simulates the most probable response of the birds population to the combination of the ambient environment factors. These mathematical models became a basis for the design of the cartographical models. The necessary information on factors is obtained from the aerophotographic maps and satellite images. Knowledge about population levels in the actual year can be obtained with the help of selective data. Large-scale maps are created by the raster method. Raster maps, which represent spatial distribution of birds, are the most informative. Small-scale maps are prepared by using the contour method and the method of quantitative polygons. The algorithm of creation of these maps and an estimation of their reliability are presented.

Введение

Животные заселяют пространство неравномерно и динамично во времени. Наиболее полно характеризовать подобные явления можно лишь на основе деления пространства на какие-либо минимально возможные единицы рассмотрения [1]. При этом неоднородность распределения животных в пространстве характеризуется совокупностью показателей обилия на выделенных таким образом участках земной поверхности. При характеристике неоднородности распределения животных геоэолог в большинстве случаев сталкивается с традиционной проблемой: фактическими данными обеспечена лишь очень малая часть характеризуемого пространства, поэтому неизбежно приходится прибегать к различного рода моделированию на преобладающие по площади необследованные территории [2–4]. Таким образом, поиск возможностей моделирования обилия животных на любых произвольно выбранных участках является весьма актуальной задачей.

1. Традиционные способы моделирования

Существует два подхода к моделированию неоднородности распределения животных – типологический и дифференциальный [5]. Типологический подход основывается на делении интересующей территории в соответствии с какой-либо ландшафтной или геобо-

танической типологией или рассмотрении гибрида из двух-трех таких типологий. Этот подход предполагает, что в пределах площади, подпадающей под какой-либо определенный таксон одной из упомянутых типологий, пространственные изменения характеристик зоологических объектов незначимы по сравнению с их различиями между такими таксонами. Моделирование при этом зачастую сводится к простой экстраполяции эмпирических данных на необследованные площади, относящиеся к тому же таксону взятой за основу типологии. Такой подход позволяет быстро давать характеристику зоологического объекта на значительных площадях [6–8].

Данный подход оказался весьма плодотворным на инвентаризационном этапе зоогеографических исследований, он позволил относительно быстро собрать и обобщить массовый количественный материал о многовидовых комплексах основных ландшафтов на обширных территориях равнин северной Евразии, гор Средней Азии и юга Сибири [9, 10]. В то же время использование такого подхода к изучению особенностей распределения отдельных видов не дало сравнимых с населенческими результатов, оно позволило выявить лишь самые общие их характеристики в макрогеографическом плане [11, 12]. Нет примеров проверяемой характеристики распределения какого-либо вида в крупном или среднем масштабе. Причина этого заключается в отсутствии значимой связи отдельных видов животных с любой из упомянутых типологий. Об этом косвенно свидетельствуют результаты специальных исследований: существенная корреляция обилия вида с какой-либо из таких типологических характеристик обнаруживается весьма редко [13–15].

Отсутствие заметных связей в большинстве случаев вполне закономерно, поскольку среди параметров, отобранных ландшафтоведами или геоботаниками для своих типологий, только случайно могут оказаться значимые для некоторых животных факторы или их маркеры. Поэтому вполне понятна неудовлетворенность зоологов, изучающих распределение отдельных видов, тем набором параметров среды, которые использовались при изучении наиболее общих географических трендов многовидовых комплексов. Один из путей решения данной проблемы — детальное рассмотрение среды [16–18]. Но при типологическом подходе эта детализация опять сводится лишь к более подробному рассмотрению все тех же мало связанных с животными типологических ландшафтных или геоботанических параметров. При любой детальности рассмотрения основной особенностью результатов данного подхода является то, что полученные характеристики по своей сути являются не характеристиками вида или населения животных, а характеристиками ландшафтной или геоботанической типологической единицы по дополнительному “зоологическому” признаку [5]. Что же касается выявления собственной (имманентной) пространственной структуры зоологического объекта, то типологический подход может обнаружить лишь отсутствие некоторых границ, значимых с точки зрения принятой типологии. Внутри же типологической единицы значимые границы не могут быть обнаружены (вследствие исходного предположения о том, что их нет).

Значительное продвижение в изучении и отображении закономерностей и особенностей распределения отдельных видов может дать второй подход — дифференциальный. Этот подход предполагает наличие у населения вида собственной пространственной структуры. Но меньшая популярность данного подхода по сравнению с типологическим объясняется значительно большей его трудоемкостью [19]. В то же время поиск функциональных связей объекта с какими-либо проявлениями среды и аппроксимация их позволяет минимизировать выборку и не менее эффективно проводить экстраполяцию на необследованные площади.

Дифференциальный подход реализован при изучении и характеристике распределения отдельных видов птиц [20, 21]. Результатом этого стало создание и обоснование системы индикационных признаков среды, полученной на основе специальной типологии внешних факторов, и комплементарной ей эколого-географической классификации птиц. На основе анализа и обобщения обширного количественного материала создана система математических моделей зависимости птиц от выделенных групп значимых для них факторов. Все это позволяет моделировать обилие птиц посредством воспроизведения их возможной реакции на совокупное воздействие всех значимых факторов.

2. Математические модели зависимости обилия птиц от различных факторов

Система индикационных признаков среды, функционально связанных с изучаемым видом, создана при рассмотрении взаимоотношений животных с пространством на основе хатчинсоновской концепции экологической ниши [22]. Все множество параметров ниши объединено в группы таким образом, чтобы они не перекрывались по своему составу и параметры, вошедшие в одну группу, не зависели от параметров из других групп. Для каждой группы параметров подобран маркер внешней среды, который сравнительно легко идентифицируется как на местности, так и по материалам дистанционного зондирования земли, а также максимально близок к истинным факторам, определяющим состояние популяции вида. Для маркеров каждой группы факторов разработаны и описаны принципы и способы количественной оценки их проявления. Это дало возможность не только измерять проявления этих факторов, но и рассчитать уравнения регрессии обилия птиц отдельно по каждой из основных групп факторов. Ниже приводится характеристика математических моделей зависимости обилия птиц от четырех наиболее значимых групп факторов. Все модели разработаны для гнездового периода.

Трофическая группа факторов удачно маркируется количеством субстрата, благоприятного для кормового передвижения вида, которое оценивается нормированной по единице величиной. Характер изменений обилия вида в зависимости от этого фактора (при прочих равных условиях) аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$\ln f(a_{in}) = 20(a_{in} - 0.6)^3, \quad (1)$$

где N_i — обилие вида i ; a_{in} — количество субстрата, благоприятного для кормового передвижения вида i .

Совокупность защитных свойств местности маркируется долей площади территориального выдела n , на которой представлена предпочитаемая данным видом топоархитектура (b_i). Количественное проявление этого параметра также выражается нормированным по единице коэффициентом. Обилие вида зависит линейно от этого фактора:

$$f(b_{in}) = b_{in}. \quad (2)$$

Широтно-климатическая группа факторов маркируется количеством дней бесснежного безморозного периода, а *долготные особенности распространения видов* — положением районов пребывания в гнездовой период относительно мест зимовок. Влияние широтно-климатических и долготных факторов на обилие птиц характеризуется наличием у каждого вида соответственно широтно-климатической зоны и долготного

сектора предпочтения. Отклонение от широтно-климатической зоны выражается продолжительностью упомянутого периода (в количестве дней), а от долготного сектора предпочтения — линейным расстоянием (в километрах). Изменения обилия, связанные с отклонением в какую-либо сторону как от широтно-климатической зоны, так и от долготного сектора предпочтения, лучше всего аппроксимируются S-образной кривой. Вполне логично, что эта линия близка к половине классической кривой толерантности. Представленные изменения можно аппроксимировать одной функцией, но с разными параметрами регрессии:

$$\ln f(c_{ni}) = -(x_{ci}c_{ni})^{r_{ci}}; \quad (3)$$

$$\ln f(d_{ni}) = -(x_{di}d_{ni})^{r_{di}}, \quad (4)$$

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. Все они оптимизированы на основе эмпирических данных для 192 видов, обитающих на Западно-Сибирской равнине, и приведены в упомянутой публикации [20].

Все перечисленные функции подобраны таким образом, чтобы результаты расчетов были представлены нормированными коэффициентами, выраженными в долях от единицы, и не имели размерности. Это значительно облегчает проведение математических операций одновременно с несколькими из этих функций.

Помимо внешних факторов обилие вида на любой части пространства зависит и от ряда внутренних факторов (плотностного потенциала каждого вида, уровня численности популяции и т. д.). Результат влияния этих факторов интегрально может быть отображен имманентной плотностью вида. *Имманентная плотность* вида i в выделе n (N_{int}) — это количество птиц, встреченных в выделе n в пересчете на единицу площади лишь той его части, которая занята пригодной для данного вида топоархитектурой при эталонном количестве предпочитаемого субстрата (0.5...0.7). С предметной точки зрения имманентная плотность отличается от традиционного обилия вида следующим. Традиционное обилие — это характеристика, в первую очередь, какой-либо части пространства в определенный период времени, а имманентная плотность — это характеристика вида в определенном районе в определенное время. Если традиционное обилие — величина, весьма изменчивая в пространстве любого масштаба, то имманентная плотность внутри небольшого по площади района относительно постоянна. Коэффициенты вариации значений N_{int} , рассчитанных для разных выделов, не превышали 35% [20].

Независимость выделенных групп параметров ниши обусловила и независимость их осей в условном гиперпространстве ниши. Поэтому и стороны условной фигуры, ограничивающей гиперобъем реализованной экологической ниши вида (или подвида) i , также будут независимы друг от друга. Это позволяет рассчитать гиперобъем данной фигуры как простое произведение ее сторон. Основываясь на этом, концептуальную модель зависимости обилия птиц от совокупного воздействия значимых факторов в самых общих чертах можно представить следующим образом:

$$\ln N_{in} = \ln N_{i0} + \ln f(a_{in}) + \ln f(b_{in}) + \ln f(c_{ni}) + \ln f(d_{ni}) + \ln k_{1,\dots,z}, \quad (5)$$

где N_{in} — обилие вида (подвида) i в гнездовой период в выделе n ; N_{int} — имманентная плотность вида i в год t ; f — функция обилия от факторов среды; $k_{1,\dots,z}$ — функция

обилия от неучтенных внешних факторов (они должны быть выделены из всей совокупности условий таким образом, чтобы каждый из них не был функцией какого-либо другого).

Поскольку результаты расчетов по отдельным функциям нормированы по единице и не обладают размерностью, их произведения в любых сочетаниях также нормированы и не имеют размерности. Размерностью обилия (число особей на единицу площади) в данной формуле обладает лишь имманентная плотность — N_{int} .

3. Картографические модели распределения птиц

Наиболее полное и наглядное отображение всех особенностей пространственного распределения птиц возможно с помощью зоогеографической карты. Приведенная концептуальная модель послужила основой для ряда практических моделей, посредством которых проводилось прогнозирование обилия птиц на необследованные территории для построения карт распределения птиц.

Для работы этих моделей необходима информация о проявлениях значимых факторов среды. Эта информация считывается с материалов дистанционного зондирования Земли с помощью выявленных маркеров. Опыт зоологического дешифрирования аэрофото- и космических снимков невелик [23, 24]. В то же время работе с материалами дистанционного зондирования Земли посвящена обширная литература. Помимо многочисленных работ, описывающих идентификацию на снимках различных ландшафтных подразделений, в литературе накоплен большой объем данных, которые прямо или косвенно могут быть использованы для зоологического дешифрирования. Особенно информативны работы, содержащие справочные данные о различных аспектах отображения на снимках водных поверхностей [25–27], отражательной способности растительности [28–32], спектральной яркости различных объектов земной поверхности [33–39]. На основе данных из этих публикаций составлена значительная часть ключевых признаков для получения информации о значимых для птиц факторах среды.

Разные факторы и разные их группы по-разному проявляются на материалах дистанционного зондирования различного класса. Наиболее информативна крупномасштабная аэрофотосъемка в видимом спектре освещения. Наиболее доступными из относительно информативных являются снимки масштаба 1 : 5 000–25 000. Наиболее удобно считывание информации о топоархитектуре. Она идентифицируется по цвету изображения и характеру его текстуры. Субстратные характеристики считываются сложнее. Для дешифрирования снимков на предмет данной характеристики неизбежно приходится прибегать к косвенным признакам. Весьма информативно совмещение изображений аэрофотосъемки и космической съемки, выполненной по каналу ближнего инфракрасного излучения.

Космические снимки значительно разнообразнее и многочисленнее аэрофотоснимков. Для получения сведений о значимых для птиц факторах наиболее информативными оказались снимки, которые выполнены в следующих диапазонах длин волн: 0.52...0.60 мкм (вегетирующая древесная и кустарниковая растительность хорошо отличается от открытых пространств); 0.76...0.90 мкм (вода дает очень темный ровный тон, чуть светлее влажные площади); 1.55...1.75 мкм (почти черный тон приобретает изображение водных поверхностей, сомкнутый рослый древостой хорошо отличается от редкостойного или низкого, светлый тон имеет поверхность сухого грунта, не закрыто-

го растительностью); 2.08...2.35 мкм (хорошо идентифицируются водная поверхность, участки грунта, свободного от растительности).

Получение информации, необходимой зоологу, не заканчивается лишь созданием и чтением спектронального изображения. Значительную пользу можно извлечь при совмещении изображений, выполненных по одному каналу, но в различные периоды года для одной и той же сцены. На такой серии снимков многие типы топоархитектуры идентифицируются при помощи различной высоты снежного покрова (который хорошо скрывает более низкие предметы).

4. Построение крупномасштабных карт

Наиболее интересно и актуально в прикладном аспекте крупномасштабное картографирование. Максимально полно и объективно отобразить особенности территориального распределения вида в крупном масштабе можно методами растрового картографирования [40–42]. Оно реализовано при создании серии карт в рамках мониторинга орнитологической обстановки в 15-километровой зоне новосибирского аэропорта “Толмачево”. Многолетний мониторинг распределения птиц предполагает создание не только серии видовых карт, но и построение временных серий карт распределения каждого вида. Для облегчения решения этой задачи средствами пакета “MapInfo 6.5” и пакета программ банка данных Института систематики и экологии животных (ИСиЭЖ) СО РАН была создана географическая информационная система (ГИС). Из-за незначительной площади, на которую создавались карты, проблемами выбора формы наименьшей территориальной единицы рассмотрения [43, 44] можно было пренебречь, поэтому в качестве наименьшей единицы принят квадрат со стороной 2 км [42]. Все карты в этой ГИС строились на единой растровой основе.

При построении карты для каждого такого квадрата необходима характеристика обилия вида. Даже на такой небольшой территории получение не только абсолютных, но и относительных эмпирических показателей численности птиц для каждого квадрата нереально. Поэтому для построения этих карт использован способ математического моделирования обилия на необследованные квадраты на основе выборочных данных и концептуальной модели зависимости обилия птиц от факторов (1), (2), (5). В данном случае площадь, на которую составлялись орнитогеографические карты, невелика, широтными и долготными изменениями обилия на ней можно пренебречь. Поэтому для расчета обилия использован лишь фрагмент уравнения (5) без учета функций $f(c_{ni})$ и $f(d_{ni})$. После подстановки на место $f(a_{in})$ и $f(b_{in})$ стандартных функций, которыми аппроксимируются эти зависимости, уравнение, по которому производился прогноз обилия на необследованные выделы, приняло следующий вид:

$$N_{in} = N_{int} b_{in} \exp[20(a_{in} - 0.6)^3] k_{1...z}, \quad (6)$$

где N_{in} — обилие вида i в гнездовой период в растре (квадрате) n ; N_{int} — имманентная плотность вида i в год t ; a_{in} — количество пригодного для вида i доступного субстрата на площади, занятой предпочитаемой топоархитектурой в растре n ; b_{in} — доля площади растра n с топоархитектурой, которую предпочитает вид i ; в число факторов $k_{1...z}$ включены такие, как антропогенное беспокойство, влияние миграций на плотность населения, а также ряд индивидуальных, значимых лишь для определенных видов факторов; характер зависимости от них обилия разных видов выявлен эмпирическим путем,

и в данное уравнение на место $k_{1...z}$ подставлялись уже готовые произведения из множителей, нормированных по единице.

Для работы данной модели необходима оценка двух групп параметров: внутренней характеристики популяции в данный год — уровня ее численности, и внешних характеристик, отражающих состояние его среды обитания. В модели первая характеристика в значительной степени отображается имманентной плотностью вида (N_{int}), которая рассчитывается для каждого года на основе выборочных данных. Величина пригодной для обитания площади на определенном участке и ее емкость в данном случае характеризуется серией остальных переменных (a_{in} , b_{in} , $k_{1...z}$).

Процесс создания картографической модели включает в себя четыре этапа.

1. Предварительно создается электронная карта деления территории на наименьшие единицы рассмотрения. Каждая из выделенных единиц (растров) для удобства имеет буквенно-числовую маркировку.

2. Проявление факторов, относящихся к группам a_{in} , b_{in} и $k_{1...z}$, считывается с аэрофотоснимков М 1 : 25 000. Для этого их изображения “регистрируются” в системе географических координат и совмещаются с картой деления территории на наименьшие единицы рассмотрения (рис. 1, а). Для каждого фактора создается свой слой электронной карты. На этом слое оконтуривается площадь, на которой представлены определенная топоархитектура, субстрат, антропогенное беспокойство определенного уровня и т. д. Выделенные таким образом контуры дополнительно “разрезаются” по границам растров. В атрибутивной таблице этого слоя имеется поле, в котором для каждого объекта (фрагмента контура, полученного в результате “разрезания”) указана принадлежность

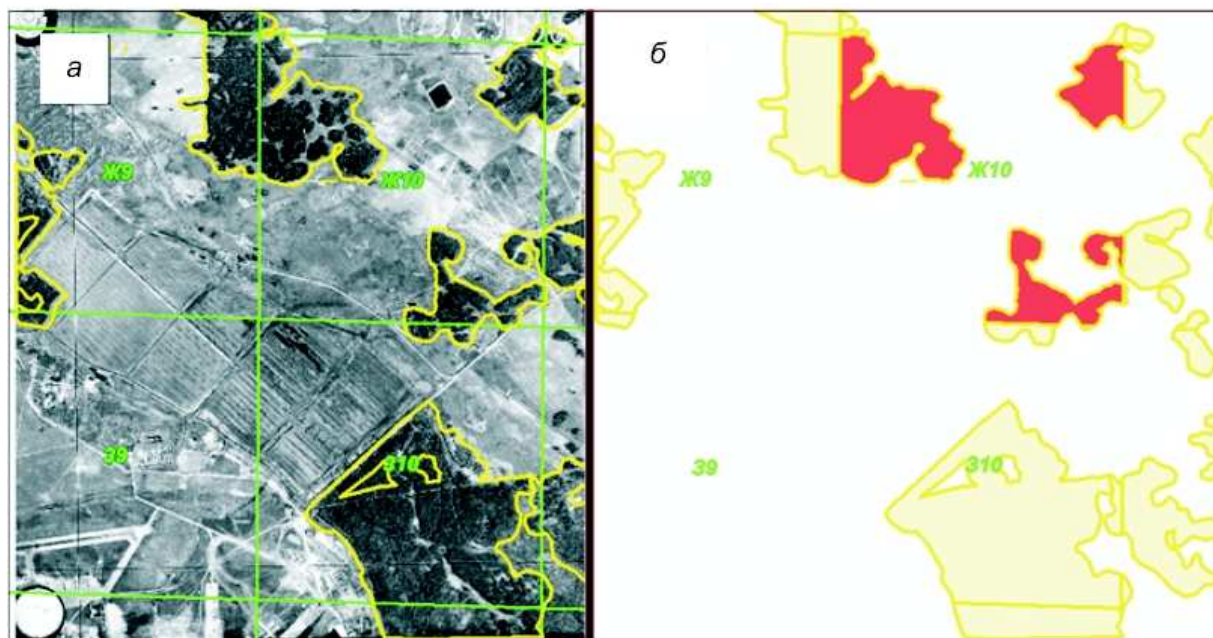


Рис. 1. Этапы получения информации о появлении факторов с аэрофотоснимка: а — желтым контуром обведены участки с топоархитектурой определенного типа (“полесье”), зелеными прямыми линиями обозначена растровая карта деления на наименьшие единицы, совмещенная со снимком; б — те же контуры участков с определенной топоархитектурой, дополнительно разделенные по границам растров; красным цветом выделены фрагменты, находящиеся в пределах одного растра (Ж10)

его к определенному растру карты. Содержание полей вещественного типа, в которых приведены абсолютные количественные характеристики контура, естественно, следует разбить пропорционально площади вновь получаемых полигонов. Таким образом, можно выбрать все фрагменты контуров определенного фактора, находящиеся в пределах одного растра, и легко вычислить их площадь (рис. 1, б). После этого создается таблица, в которой каждому фактору отведено отдельное поле вещественного типа, где хранится количественная информация о его проявлении в целом для каждого растра. Информация этих таблиц и является факторной основой для прогнозирования обилия птиц в каждом необследованном растре с помощью математической модели (6).

3. Для определения N_{int} (имманентной плотности) каждого из видов в данном районе закладывается не менее десяти учетных площадей, величина каждой из которых близка к площади квадратов растровой основы. В этих выделах проводится учет птиц по традиционной методике [45]. Учетные площади размещаются в пространстве таким образом, чтобы представительно 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.

4. После оценок N_{int} и проявления факторов для каждого из выделенных квадратов (растров) с помощью уравнения (6) рассчитано обилие всех фоновых видов, обитающих на картируемой площади. Обилие выражено в числе особей на квадратный

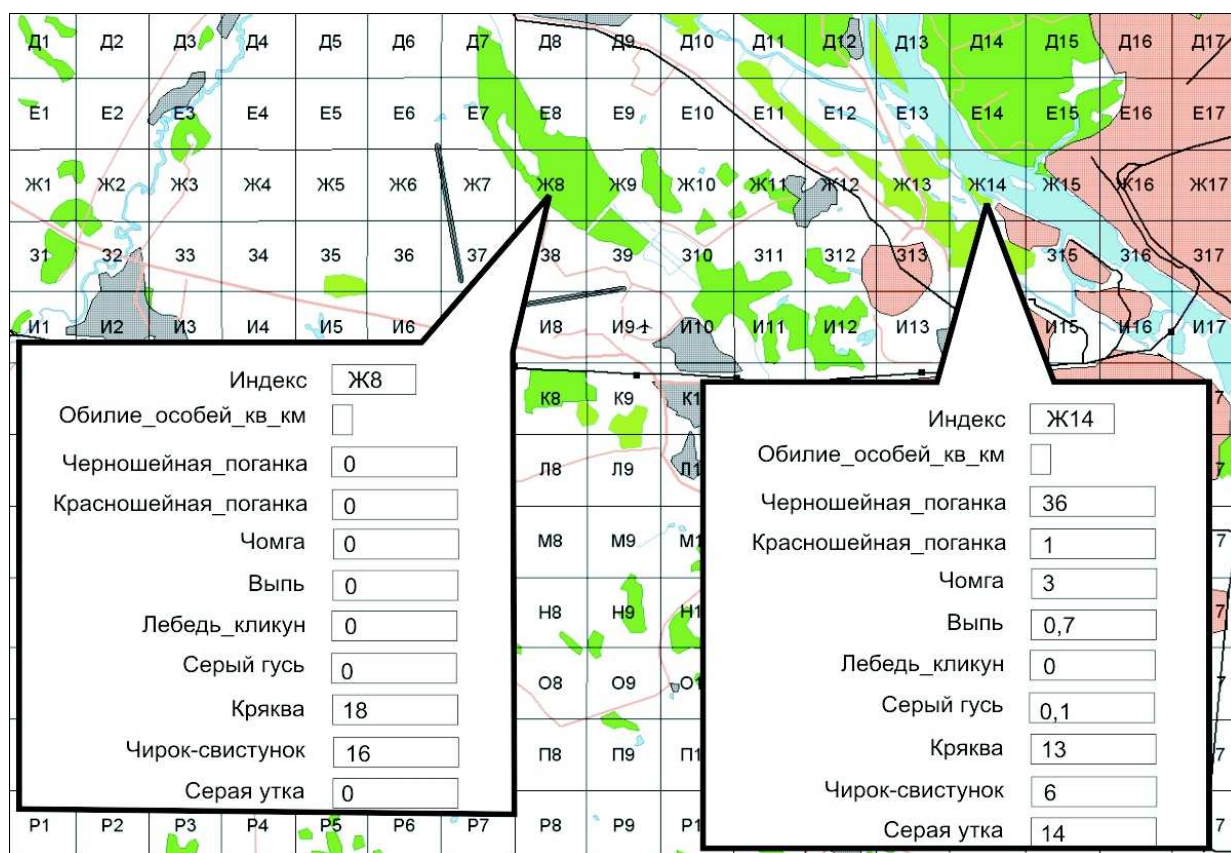


Рис. 2. Пример информационных окон (фрагмент) для растров исходной электронной карты распределения птиц

километр. В результате расчетов для каждого вида получается показатель обилия в каждой наименьшей единице. Результаты таких расчетов по всем видам для определенного временного среза сводятся в единую таблицу. В такой таблице для каждого вида определено отдельное поле вещественного типа (рис. 2). В результате получается растровая карта, атрибутами которой является обилие каждого вида в каждой наименьшей единице. Эта карта считается исходной орнитологической картой, на основе которой строятся серии тематических карт. В частности, по каждому полю атрибутивной таблицы средствами картографического пакета легко построить тематическую карту, отображающую неоднородность распределения соответствующего вида.

Пространственное распределение вида отображается на карте цветом раstra с тем или иным уровнем обилия, густота заливки пропорциональна обилию. Легенда карты выполнена интервальным способом. Для уменьшения нагрузки границы растров на такой карте не обозначены, но везде приведена их буквенно-цифровая маркировка (рис. 3). Под собственно тематический слой подложены основные элементы топоосновы, но раскрашенные не сплошной заливкой, а легкой штриховкой. Такая раскраска вспомогательных элементов при визуальном анализе карты позволяет в первую очередь отчетливо видеть предметную нагрузку. В то же время на такой карте несложно ориентироваться пользователю, поскольку одновременно просматриваются и наиболее привычные для пользователя элементы топографических карт (леса, водоемы, дороги, поселки).

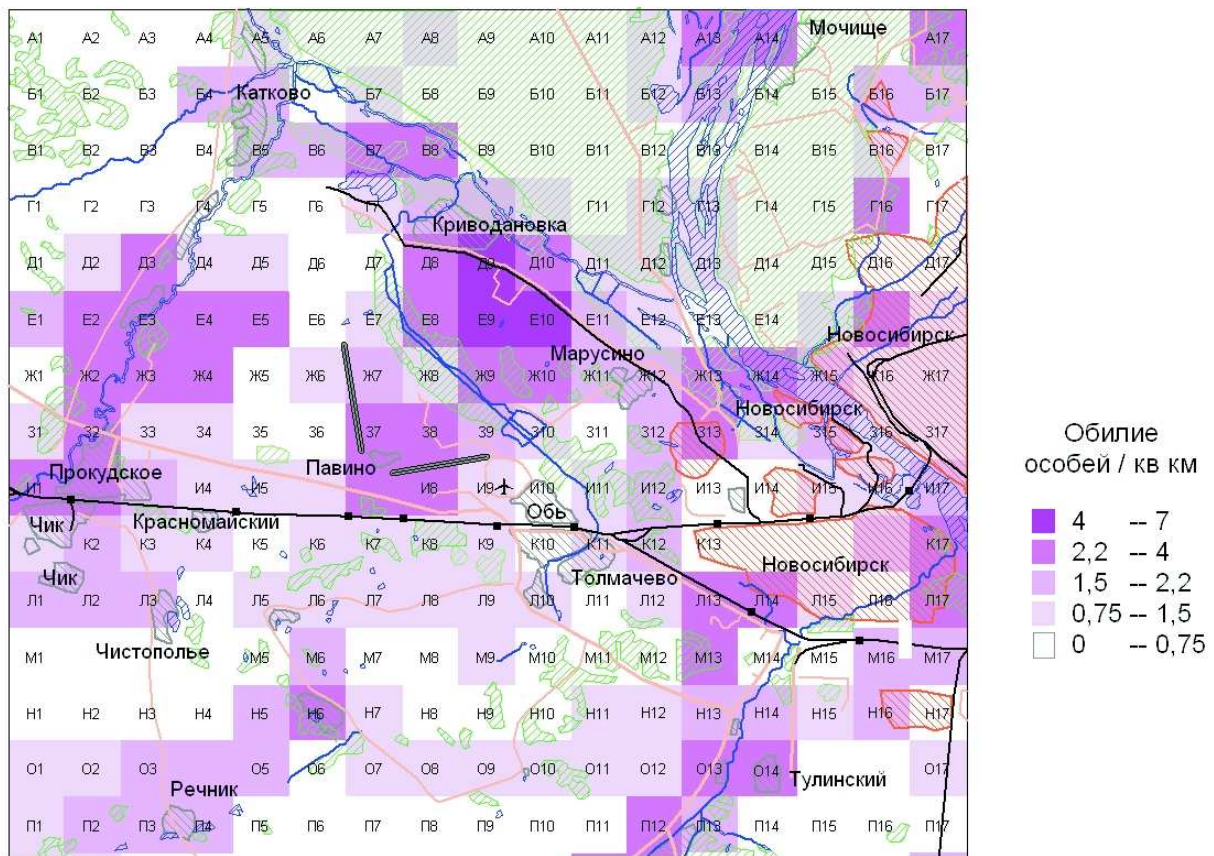


Рис. 3. Фрагмент крупномасштабной растровой карты распределения отдельного вида *Milvus migrans*

Электронные карты могут выполнять больше функций и значительно быстрее трансформироваться, но не всегда хорошо выполнять визуальные иллюстративные функции. В частности, исходная орнитологическая карта, внешне представляющая собой лишь некую сетку (совокупность растров, см. рис. 2), совершенно не служит для иллюстраций, а является информационной основой для построения множества других карт. Производные от нее карты распределения птиц более наглядны (см. рис. 3), но тоже с затруднениями воспринимаются предметниками-биологами. Их генерализация и отображение ее результатов в более мелком масштабе способом количественных ареалов делают их вид более привычным и понятным для широкого круга пользователей. Последние карты целесообразнее делать и в форме твердых копий.

5. Построение мелкомасштабных карт

Классический способ составления мелкомасштабных карт — это генерализация карт более крупного масштаба. Но в настоящее время из-за чрезвычайной трудоемкости и высокой их себестоимости крупномасштабные карты распределения отдельных видов пока представляют большую редкость. Это будет возможно лишь в случае, когда появится неформальная практическая потребность в такого рода научной продукции. Наиболее реально в настоящее время создавать такие карты с помощью моделирования плотности и характера распределения птиц на необследованные территории, опираясь на выборочные данные и концептуальные представления о закономерностях распределения каждого вида. Такое моделирование рассматривается на примере создания серии карт масштаба 1 : 10 000 000, отображающих распределение ряда видов охотничьих птиц на Западно-Сибирской равнине в гнездовой период. В качестве выборочных данных для этого использованы результаты учетов птиц в репродуктивный период в 1020 территориальных выделах, расположенных во всех природных зонах и подзонах Западно-Сибирской равнины и в северных районах Алтае-Саянской горной страны. Все эти материалы хранятся в банке данных ИСиЭЖ СО РАН.

Для наиболее полной количественной характеристики распределения птиц на карте использовано сочетание методов изолиний, количественных и качественных ареалов. Изолинии отображают основные тенденции плотностного потенциала (имманентной плотности) вида на Западно-Сибирской равнине. Количественными ареалами обозначены площади, на которых вид встречается сравнительно закономерно. Здесь изображено два типа распределения — сплошное и “пятнистое”, последний термин заимствован у Е. Пианка [46]. Под сплошным понимается распределение, при котором вид обнаруживается более чем на трети участков площадью 5 км² при условии случайного выбора таких участков в пределах изображенного контура. Пятнистое распределение предполагает закономерное чередование таких по величине участков, заселенных видом, с 5–10 участками, где вид не обнаруживается (также при случайном выборе таких участков в пределах обозначенных контуров). Первый из этих типов обозначен “теплыми” цветами спектра, второй — “холодными”. Приведенные для них плотностные характеристики, которые представлены в виде доверительных интервалов при 95 %-ном уровне значимости, являются результатом усреднения всех имеющихся эмпирических данных, подпадающих под соответствующие типы распределения. Третий тип — спорадичное распределение — отображен способом качественного ареала. Ему задан белый цвет. Никаких количественных характеристик для него не приводится, поскольку на подав-

ляющей площади изображенных таким образом пространств вид отсутствует, а на чрезвычайно редких и незакономерно распределенных участках птицы могут встречаться с плотностью в диапазоне от нуля до величины, изображенной для данного места способом изолиний. Все количественные характеристики на картах приводятся из расчета на условный квадрат площадью 5 км². Таким образом, выполнена своего рода типология распределения в пространстве пригодных для обитания вида участков. Все площади, соответствующие перечисленным категориям для каждого вида, идентифицировались на серии космических снимков среднего и высокого разрешения и оконтуривались на отдельном слое электронной карты.

Теоретической основой для составления карт распределения отдельных видов послужила упомянутая концептуальная модель (1)–(5).

Полное уравнение совокупного влияния всех значимых факторов (5) использовалось лишь для проверки информативности этого способа. Для построения же данной совокупности карт применена модель на основе произведения лишь (3) и (4) уравнений. После преобразования и некоторой модификации, сущность которых опубликована [20], эта модель принимает вид следующей системы уравнений:

$$\ln N_{in} = \left[-(x_{ci}c_{ni} + x_{di}d_{ni}) \frac{\sqrt{c_{ni}^2 + d_{ni}^2}}{c_{ni} + d_{ni}} \right]^{rsi} ; \quad (7)$$

$$\ln N_{in} = - \left[(x_{ci}c_{ni})^{rci} + (x_{di}d_{ni})^{rdi} \right]. \quad (8)$$

Уравнение (7) моделирует изменения обилия при одновременном удалении по широте в сторону зимовок и отклонении по долготе, а уравнение (8) — при одновременном удалении по широте в противоположную от зимовок сторону и отклонении по долготе. Внутри широтно-климатической зоны предпочтения (т. е. при $c_{ni} = 0$) уравнения (7) и (8) принимают один и тот же вид.

Эта система уравнений моделирует плотностный потенциал вида, т. е. максимально возможную имманентную плотность в зависимости от широтно-климатических и географических факторов и независимо от того, есть или нет на той или иной площади пригодные для вида остальные условия. Данные о проявлении широтно-климатических факторов заимствованы из Климатического атласа СССР [47]. Затем для величины этой плотности задавались интервалы, границы которых отображались на карте изолиниями. Эти изолинии накладывались на карту, отображающую локализацию площадей с различным типом распределения вида. Все эти площади и места сбора эмпирических данных группировались в соответствии с тем, в зону какого из выделенных интервалов имманентной плотности они попадают.

Плотностные характеристики для сплошного и “пятнистого” типов распределения рассчитаны по эмпирическим данным, полученным со всех пространств, подпадающих под соответствующие типы распределения в том же интервале имманентной плотности. В легенде, выполненной интервальным способом, приведены доверительные интервалы при 95%-ном уровне значимости. На площадях, достаточно обеспеченных эмпирическими данными, соотношение величин, полученных при расчетах для разных районов, было очень близко к теоретическому, которое предполагает полная математическая модель (5).

6. Информативность созданных моделей

Крупномасштабные модели. Оценка степени соответствия модели и реальности производится при помощи предварительного прогноза гнездового обилия в 10–11 выделах, в которых впоследствии проводятся учеты для определения имманентной плотности (N_{int}) в данный год. Расчет по данному уравнению проводится без участия множителя N_{int} , поскольку его величина бывает еще не определена до начала учетных работ. Таким образом, прогнозные расчеты для каждого вида по указанному уравнению проводятся до начала учетных работ на территорию будущих учетных трансектов. После проведения там учетов оценивается сходство модели с полученными результатами. Для такой оценки по каждому виду рассчитывается коэффициент корреляции модельных значений обилия и эмпирических. Среднее арифметическое коэффициентов корреляции для всех учтенных видов в 2001 г. составило 0.65. Средняя взвешенная величина (чем выше сумма всех показателей обилия вида, тем больше вклад его коэффициента корреляции в среднюю) коэффициентов корреляции составила 0.81. При этом, как и в других случаях такого прогноза, отчетливо просматривается тенденция: чем заметнее вид и чем он многочисленнее (а следовательно, надежнее эмпирическая оценка его обилия), тем выше коэффициент корреляции. В 2003 и 2004 гг. подобный предварительный прогноз был повторен только для самолетоопасных видов. Для этой выборки простая средняя величина коэффициентов корреляции в оба года составила 0.68, а средняя взвешенная — 0.80.

Мелкомасштабные модели. При построении мелкомасштабных карт в разной степени использованы элементы модели совокупного влияния всех значимых для птиц факторов (5). Для оценки их информативности взяты все доступные материалы, где имеется хотя бы экспертная оценка этих факторов. Сюда вошли учеты птиц в первой половине лета в 171 пространственном выделе на 12 ключевых участках, распределенных в интервале 55–69° с.ш. и 65–84° в.д. Для каждого из этих выделов на основе модельного уравнения рассчитано обилие каждого встреченного вида птиц и сопоставлено с соответствующими им эмпирическими данными. Среднее арифметическое коэффициентов корреляции модельных и эмпирических значений для всех 192 видов составило 0.43 ± 0.02 , а средняя взвешенная величина (с учетом суммарного обилия каждого вида) 0.66 ± 0.01 . Наибольшие коэффициенты корреляции (0.51... 1.00) обнаружены для 73 видов (38%), все они — хорошо заметные обычные или многочисленные птицы, эмпирические данные по которым весьма надежны.

Список литературы

- [1] ХАРВЕЙ Д. Научное объяснение в географии. М.: Прогресс, 1974. 502 с.
- [2] ТУПИКОВА Н.В. Зоологическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1969. 249 с.
- [3] ТУПИКОВА Н.В., КОМАРОВА Л.В. Принципы и методы зоологического картографирования. М.: Изд-во МГУ, 1979. 190 с.
- [4] SAUER J.R., PENDLETON G.W., ORSILLO S. Monitoring Bird Populations by Point Counts. PSW-GTR-149. Albany: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1995. 187 p.

- [5] КОРЕНБЕРГ Э.Я. Биохорологическая структура вида (на примере таежного клеща). М.: Наука, 1979. 172 с.
- [6] КУЗЯКИН А.П. Зоогеография СССР // Уч. зап. Моск. обл. пед. ин-та им. Н.К. Крупской, 1962. Т. 59. С. 3–182.
- [7] КУЗЯКИН А.П. Первые итоги исследований по ландшафтнoй орнитoгеoграфии СССР // Современные проблемы орнитологии. М., 1965. С. 223–231.
- [8] ЧЕЛЬЦОВ-БЕБУТОВ А.М. Зоогеографическое картографирование: основные принципы и положения // Вест. МГУ. Сер. География. 1976. Т. 2. С. 50–56.
- [9] РАВКИН Ю.С. Реализация и развитие зоогеографических представлений А.П. Кузьякина в Западной Сибири // Систематика животных, практическая зоология и ландшафтнaя зоогеография. М.: Изд-во Моск. общества испытателей природы, 1991. С. 47–58.
- [10] РАВКИН Е.С., РАВКИН Ю.С., ВАРТАПЕТОВ Л.Г. и др. Классификация летнего населения птиц равнин Северной Евразии // Сиб. эколог. журн. 2001. Т. 6. С. 741–766.
- [11] РАВКИН Е.С. Особенности летнего распределения птиц равнин Северной Евразии // Успехи современной биологии. 2003. Т. 123, № 4. С. 421–429.
- [12] РАВКИН Е.С., РАВКИН Ю.С., ВАРТАПЕТОВ Л.Г. и др. Классификация птиц по сходству летнего распределения на равнинах Северной Евразии // Бюл. Моск. общества испытателей природы. Отделение биология. 2003. Т. 108, № 3. С. 26–33.
- [13] КУРЛАВИЧУС П. Биотопическое распределение птиц в агронасаждениях. Вильнюс: Мокслас, 1986. 108 с.
- [14] KURLAVICIUS P. Birds of Forest Islands in South-East Baltic Region. Vilnius: Baltic ECO, 1995. 263 p.
- [15] MONJEAU A., BIRREY E., PHILLIPS C., SIKES R. Small mammals response to the hierarchical nature of landscape structure // Euro-American Mammal Congr., Santiago de Compostela, Spain, July 19–24, 1998. P. 23.
- [16] ENEMAR A., NILSSON L., SJOSTRAND B. The composition and dynamics of the passerine bird community in subalpine birch forest, Swedish Lapland. An 20-years study // Ann. Zool. Fenn. 1984. Vol. 21. P. 321–338.
- [17] SVENSSON S., CARLSSON U., LILJEDAHN G. Structure and dynamics of an alpine bird community. A 20-th year study // Ibid. P. 339–350.
- [18] БУРСКИЙ О.В. Структура сообщества воробьиных птиц Центральной Сибири // Изучение биологического разнообразия на Енисейском экологическом трансекте. Животный мир. М., 2002. С. 218–307.
- [19] НЕЕФ Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М.: Прогресс, 1974. 220 с.
- [20] Юдкин В.А. Организация пространственного распределения птиц в репродуктивный период. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 105 с.
- [21] Юдкин В.А. Птицы подтаежных лесов Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 2002. 488 с.

- [22] HUTCHINSON G.F. The niche: a abstractly inhibited hypervolume // The Ecological Theatre and the Evolutionary Play. New Haven, Conn., Yale Univ. Press, 1965. P. 26–78.
- [23] ЕЛЬСКИЙ Г.М., ШИШИКИН А.С. Оценка местообитаний растительноядных млекопитающих с использованием аэрокосмической информации // Дистанционные исследования природных ресурсов Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. С. 176–184.
- [24] СИНИЦЫН Н.Г. Использование сверхкрупномасштабных аэрофотоснимков в изучении поселений бобров (*Castor fiber*) // Зоол. журн. 1992. Т. 71, № 7. С. 130–139.
- [25] КУДРИЦКИЙ Д.М., ПОПОВ И.В., РОМАНОВА Е.А. Основы гидрографического дешифрирования аэрофотоснимков. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 334 с.
- [26] KIRBY R.E. Mapping wetlands on beaver flowages with 35 mm photography // Canadian Field-Naturalist. 1976. Vol. 90, N 4. P. 423–431.
- [27] ГИЕНКО А.Я. Воды — аэрокосмический снимок — карта: Географо-гидрологический анализ картосоставительского процесса. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. 224 с.
- [28] ВИКТОРОВ С.В. Аэроландшафтная индикация последствий деятельности человека в пустынях. М.: Недра, 1973. 57 с.
- [29] MERIAM S.A. Phenology and remote sensing // Phenology and seasonality modeling. 1974. P. 55–75.
- [30] ХАРИН Н.Г. Дистанционные методы изучения растительности. М.: Наука, 1975. 245 с.
- [31] RUNNING S.W. Global primary production from terrestrial vegetation: estimates integrating satellite remote sensing and computer simulation technology // Sci. Total Environ. 1986. Vol. 56. P. 233–242.
- [32] ХАРУК В.И., ОЛЬШАНСКИЙ А.М., ЕГОРОВ В.В. Дистанционное зондирование в оценке состояния растительного покрова // Космические методы изучения биосферы. 1990. С. 59–66.
- [33] ИССЛЕДОВАНИЕ оптических свойств природных объектов и их аэрофотографического изображения / Отв. ред. Д.А. Янутш, Ю.К. Юцевич. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1970. 170 с.
- [34] КНИЖНИКОВ Ю.Ф., КРАВЦОВА В.И. Многозональная аэрокосмическая съемка и ее применение при изучении окружающей среды. Обнинск: Информ. центр ВНИИГМИ-МЦД, 1978. 47 с.
- [35] РАЧКУЛИК В.И., СИТНИКОВА М.В. Отражательные свойства растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
- [36] КОНДРАТЬЕВ К.Я., ФЕДЧЕНКО П.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Наука, 1982. 216 с.
- [37] АКОВЕЦКИЙ В.И. Дешифрирование снимков. М.: Недра, 1983. 375 с.
- [38] KRUSE F.A. Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data // Remote Sensing of Environment. 1993. Vol. 44. P. 145–163.

- [39] LANDGREBE D. An Introduction to Multispace: Version 5. 2001. WestLatayette (Indiana, USA), 2001. 171 p.
- [40] ДЕМЕРС М.Н. Географические информационные системы. Основы. М.: Дата+, 1999. 490 с.
- [41] REINO L.M. An atlas of breeding birds in the Montesinho Natural Park (Northeastern Portugal) in 1992–1994 // Bird Census News. 2000. Vol. 13, N 1–2. P. 175–179.
- [42] Юдкин В.А. Картографирование распределения птиц для мониторинга их ресурсов // Картографическое и геоинформационное обеспечение управления региональным развитием. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. С. 261–265.
- [43] КИТОВ А.Д. Компьютерный анализ и синтез геоизображений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 220 с.
- [44] КИТОВ А.Д., ЧЕРКАШИН А.К. Грид-структуры как инвариантная основа реализации геоинформационных систем // Интеркарто/ИнтерГИС-10: устойчивое развитие территорий: геоинформационное обеспечение и практический опыт. Владивосток: Чаньчунь, 2004. С. 17–24.
- [45] РАВКИН Ю.С. К методике учета птиц лесных ландшафтов // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. Новосибирск: Наука, 1967. С. 66–75.
- [46] ПИАНКА Э. Эволюционная экология. М.: Мир, 1981. 400 с.
- [47] КЛИМАТИЧЕСКИЙ атлас СССР. М.: ГУГК, 1960.

Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.