

На правах рукописи



МУХАРАМОВА СВЕТЛАНА СЯСОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТООБИТАНИЙ
РАСТЕНИЙ**

Специальность 03.02.08 – Экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Казань – 2010

Работа выполнена на кафедре моделирования экологических систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Савельев Анатолий Александрович

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор
Готов Николай Васильевич

кандидат физико-математических наук
Грабарник Павел Яковлевич

Ведущая организация: Институт экологии Волжского бассейна РАН,
г. Тольятти

Защита состоится « 18 » ноября 2010 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.081.19 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

Тел. 8 (843)233-78-67; факс 8 (843) 238-76-01; E-mail: attestat.otdel@ksu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан « » октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зелеев Р. М.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Осознание глобальной проблемы сохранения биоразнообразия привело к выработке международным сообществом Конвенции о Биологическом Разнообразии и разработке национальных стратегий изучения и охраны флоры и фауны отдельных территорий. Сосудистые растения, являясь существенной частью природных систем, играют важнейшую экологическую роль в биосфере с точки зрения существования и устойчивости наземных экосистем на всех уровнях, от топологического до глобального. Это делает несомненно актуальной задачу изучения, оценки и моделирования экологических условий их местообитаний на различных масштабных уровнях как необходимой составляющей пространственной оценки биоразнообразия.

Необходимость изучения пространственного распределения экологических условий местообитаний растений на региональном уровне обуславливается тем, что получение достоверных знаний о таких закономерностях важно для оценки как современного, так и потенциального биоразнообразия региона, что в свою очередь является одной из важных научных задач, имеющих фундаментальное значение в свете современных концепций устойчивого развития и оптимизации природопользования. Одним из методов описания экологических условий местообитаний растений на региональном уровне могут быть экологические шкалы. Успешное решение такой задачи требует не только сбора и накопления значительного по объему фактологического материала, но и его осмысления с целью выявления региональных закономерностей, проработки вопросов корректного пространственного анализа и моделирования.

Развитие современных вычислительных и информационных технологий, включая геоинформационные, появление новых методов статистического анализа и моделирования, а также возросшая в настоящее время доступность и полнота данных об окружающей среде, в первую очередь данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), создание компьютерных геокодированных баз данных (БД) о растительности (БД геоботанических описаний, типов растительных сообществ, пространственных единиц растительности), открывают новые возможности для решения задачи оценки экологических условий местообитаний растений (условий экотопа) для больших территорий в региональном масштабе исследований.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы являлось создание количественных моделей регионального пространственного распределения экологических условий местообитаний растений в терминах экологических шкал с использованием данных национальных и глобальных

программ наблюдения Земли (на примере Республики Татарстан (РТ)). Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ источников геоинформации с точки зрения ее использования для прогноза условий экотопа на региональном уровне для модельной территории.

2. На основе гипотезы об экологической индивидуальности видов разработать вероятностную формализацию и математические модели оценки экотопических условий (в терминах экологических шкал) для заданного видового состава сосудистых растений с учетом возможной неравномерности шкал.

3. Разработать математические модели оценки пространственного распределения экологических условий местообитаний растений, базирующиеся на современных методах многомерного статистического анализа, выполнить такую оценку для территории РТ, и провести сопоставление полученных результатов с известными данными.

Научная новизна. Впервые на примере сосудистых растений развит вероятностный подход к формализованному описанию условий экотопа как вероятностного распределения значений экологических шкал, базирующийся на теоретических положениях экологии (гипотезе об экологической индивидуальности видов, законе толерантности). Предложены и реализованы основанные на этом подходе два метода моделирования пространственного распределения экологических условий местообитаний растений, а именно, прямой – использующий статистические модели зависимостей экотопических факторов от пространственно-распределенных характеристик территории, полученных дистанционным путем, и косвенный – использующий предварительное построение вероятностной модели видового состава по этим характеристикам. Создан комплекс компьютерных программ, реализующих оба метода, выполнена оценка пространственного распределения условий экотопа для территории РТ и показана адекватность полученной оценки.

Теоретическая и практическая значимость. Установленные модельные зависимости развивают представления о взаимосвязях пространственной структуры растительного покрова и пространственного распределения экологических условий местообитаний растений, обусловленных комплексом абиотических факторов в условиях зональных экотонов. Разработанная автором специализированная геоинформационная система (ГИС) регионального уровня пространственной детализации для территории РТ может применяться как основа для проведения экологических исследований. При наличии флористических баз данных разработанные подходы к оценке условий местообитаний растений могут быть реализованы для других территорий с использованием общедоступной геоинформации, полученной дистанционным путем.

Результаты работы применяются в учебном процессе Казанского (Приволжского) федерального университета при чтении специального курса «Информационные флористические и фаунистические базы данных», в разработанных автором курсах «ГИС и геоинформационные базы данных в экологии и природопользовании» и «Моделирование пространственных явлений» для студентов факультета географии и экологии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Количественная оценка экотопических условий в региональном масштабе эффективно реализуется на основе геоинформации БД национальных и глобальных программ по мониторингу поверхности Земли и региональных флористических БД, организованных в единой ГИС.
2. Вероятностный подход в рамках закона толерантности и гипотезы об экологической индивидуальности видов позволяет формализовать оценку условий экотопа в терминах экологических шкал и выполнять ее с использованием информации флористических БД.
3. Моделирование пространственного распределения экологических условий местообитаний видов может быть осуществлено прямым методом – по зависимостям экотопических факторов от пространственно-распределенных характеристик территории, и косвенным методом – по пространственно-распределенным характеристикам территории строятся вероятностные списки видов, с последующей оценкой по ним экотопических факторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на конференциях *регионального уровня*: VII республиканской научной конференции «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан» (Казань, 2007); Ежегодных итоговых научных конференциях Казанского университета (1999-2010); *всероссийского уровня*: Всероссийской научной конференции «Современные аспекты экологии и экологического образования» (Казань, 2005); Всероссийской научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» (Казань, 2009); *международного уровня*: Международной научно-практической конференции «Современные проблемы земледелия и экологии» (Курск, 2002); Международном симпозиуме «Информационные системы по биоразнообразию видов и экосистем» (С.Петербург, 2003); Международной научной конференции «Геоситуационный анализ» (Казань, 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 26 печатных работ, из них три в журналах списка ВАК, три работы вошли в монографию (Zuur et al., 2007).

Личный вклад автора состоит в формулировании задач, выборе методов исследования, в поиске и первичной обработке геоинформации из

различных источников, ее организации в ГИС, а также в построении статистических моделей, их интерпретации и оценке адекватности, получении и интерпретации прогнозов, разработке необходимого программного обеспечения. Соавторами в публикациях выступили научный руководитель, студенты, выполнявшие исследования под руководством автора, а также специалисты смежных областей, предоставившие ряд данных и участвовавшие в их обсуждении.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 178 страницах, содержит 157 страниц основного текста и 21 страницу приложений, 14 рисунков и 14 таблиц. Список литературы включает 231 наименование, 106 из них на иностранных языках.

ГЛАВА 1. КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИТОИНДИКАЦИЯ В МОДЕЛЯХ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА (обзор литературы)

Рассмотрены основные положения учения об экологических факторах, приводится ряд классификаций, подробнее рассмотрены абиотические факторы (климатические, эдафические, топографические), а также понятия о биотопе, экотопе, местообитании, экологической нише (Одум, 1975; Уиттакер, 1980; Shelford, 1913; Hutchinson, 1957). Признание непрерывности растительного покрова (концепция континуума) в совокупности с гипотезой экологической индивидуальности видов (Раменский, 1910; Gleason, 1926) обосновывает возможность геоботанической индикации (оценки характеристик среды обитания по растительному покрову). Приводятся литературные данные о методах индикационной геоботаники, сведения о фитоиндикационном значении растений (Викторов и др., 1962, 1988; Миркин, Розенберг, 1978, 1979; Биоиндикация..., 1994; Розенберг, 1998; Миркин и др., 2001; Булохов, 2004, 2006; Clements, 1920; Lewin et al., 1988). Рассмотрен метод экологических шкал, основанный на ординации растений вдоль градиентов факторов среды и признанный одним из основных методов индикационной геоботаники и оценки условий местообитания растений (Работнов, 1995; Заугольнова и др., 1995; Оценка ..., 2000; Селедец, 2000; Смирнова и др., 2002; Королук, 2007). Приводится краткий обзор основных экологических шкал (Раменский и др., 1956; Цыганов, 1983; Hundt, 1964; Klapp, 1971; Ellenberg, 1974, 1996; Landolt, 1977). Обобщены литературные данные о пространственном моделировании в экологии, в том числе о моделировании растительного покрова; описан ряд современных статистических методов моделирования распространения видов растений наземных экосистем, а также подходов к моделированию местообитаний.

ГЛАВА 2. ПРИРОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дается ландшафтно-экологическая характеристика территории РТ, особенностью которой является наличие границ крупных единиц районирования по геоморфологическим условиям, по климатическим условиям, почвенно-географического и ботанико-географического районирования, а также комплексного физико-географического (ландшафтного) районирования (Геоморфологическое..., 1980; Колобов, 1968; Климат и загрязнение..., 1995; Почвы СССР, 1979; Атлас РТ, 2005; Растительность Европейской..., 1980; Флора Восточной..., 1996; Бакин и др., 2000). Пространственная неоднородность экологических условий местообитаний растений определяет основные особенности растительного покрова, сложность его пространственной структуры и разнообразие флористического и формационного состава.

Приведен краткий перечень использованных в работе данных, методов анализа и программного обеспечения, более подробно рассмотренных в главах, посвященных их применению. В качестве источника данных о растительном покрове исследуемой территории использована электронная флористическая БД «ФЛОРА» (свидетельство о гос.регистрации № 2010620050) (Прохоров, 2006; Рогова и др., 2010), содержащая сведения авторских флористических и геоботанических описаний, а также различную справочную информацию о видах. В качестве источников геоинформации для решения поставленных задач рассматривались находящиеся в настоящее время в свободном доступе результаты различных национальных и глобальных проектов по мониторингу поверхности Земли и атмосферы, основанные в первую очередь на данных дистанционного зондирования.

При оценке условий местообитаний на основе описания видового состава сосудистых растений применялся метод экологических шкал. Использовались индикационные значения по шкалам, разработанным Д.Н.Цыгановым (Цыганов, 1983). Экологическое пространство описывалось восемью факторами (температурный режим, континентальность и криоклиматичность климата, условия освещенности, увлажнение, кислотность, азотообеспеченность и солевое богатство почвы). Для формализации оценки экотопических условий по видовому составу сосудистых растений применялся аппарат теории вероятностей.

Разработанные подходы к оценке пространственного распределения условий экотопа реализуются на основе геоинформационных технологий. Для работы использовались ГИС-пакеты MapInfo Professional 6.0, Surfer 8, а также специально созданное программное обеспечение. Обработка ДДЗЗ (геометрическая коррекция, расчет тематических индексов и др.) выполнена с использованием программы ScanEx Image Processor v.3.0.

Исследование взаимосвязей между экологическими факторами и «физическими» характеристиками территории проводилось методами корреляционного анализа. Для построения моделей зависимостей факторов шкал и присутствия видов флоры от характеристик территории применялись методы многомерного статистического анализа: общая линейная модель, обобщенная линейная модель (логистическая регрессия) и обобщенная аддитивная (нелинейная) модель. Построение моделей и пространственных прогнозов проводилось в среде статистического программирования R (Ripley, 2001; Савельев и др., 2007), а также при помощи собственного программного обеспечения на языке программирования C++ и языке SQL.

ГЛАВА 3. СОСТАВ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ ГЕОИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЭКОТОПА

3.1. Предлагаемые подходы к решению задачи пространственного прогноза условий экотопа. Если описывать экологические условия местообитаний растений в терминах факторов, представленных в экологических шкалах, то получить оценку этих условий на площадках геоботанических описаний можно на основе информации о видовом составе растительного сообщества. В том месте, где видовой состав фитоценоза не описан, задачу оценки экотопических условий предложено решать на основе двух подходов, прямого и косвенного, с привлечением доступной геоинформации о «физических» характеристиках территории, связанных зависимостями либо с факторами шкал (прямой подход), либо с присутствием видов растений (косвенный подход), при условии построения статистических моделей, описывающих эти зависимости.

В обоих случаях предполагается равновесие флористического состава растительного покрова и окружающей среды для изучаемой территории, а также справедливость индивидуалистической гипотезы, в соответствии с которой виды обладают различным независимым откликом на внешние условия. Эти предположения позволяют использовать в исследовании метод экологических шкал, а также моделировать присутствие видов флоры независимо друг от друга.

3.2. Данные о растительном покрове. Современные компьютерные технологии накопления и хранения данных позволяют аккумулировать сведения о биологическом разнообразии в информационных базах и применять их для решения теоретических и практических задач, в том числе и для индикационных оценок (Заугольнова, Ханина, 1996; Зверев, 2007; Голуб, 2009; Рогова и др., 2010). Наличие координатной привязки данных делает возможным проведение пространственного анализа и моделирования (Рогова и др., 1999). Используемая в работе флористическая БД «ФЛОРА» в настоящее время содержит сведения о более 200 000 местонахождений видов растений на территории РТ за период с 1883 г. по 2009 г. Справочник видов

включает в себя более 2000 таксонов (видов, подвидов и гибридогенных таксонов), выявленных на исследуемой территории в ходе последней инвентаризации флоры (Бакин, 2000); названия видов даны согласно сводке С.К. Черепанова (1995). В работе использовалась версия БД, содержащая информацию для 5035 площадок описаний, из которых 3035 геокодированы, т.е. имеют географическую (координатную) привязку, полученную либо с помощью GPS, либо по отметкам автора непосредственно на карте. Суммарно на всех площадках было описано 1268 видов, из которых оценку всех преферендумов по шкалам Цыганова имеют 745 видов, хотя бы одного – 1121 вид. На 5034 площадках присутствует хотя бы один такой вид, на 4927 площадках – не менее 7 видов. Из 3035 площадок, имеющих координатную привязку и, следовательно, пригодных для пространственного анализа, на 2990 площадках присутствует не менее 7 видов, имеющих преферендумы по шкалам Цыганова.

3.3. Состав геоинформации о характеристиках территории. Анализ общедоступных источников пространственно-распределенной информации, потенциально пригодной для прогноза экологических условий местообитаний растений там, где отсутствует геоботаническое описание и нет возможности напрямую прибегнуть к зависимостям индикационных экологических шкал, показал, что на региональном уровне исследований в качестве подобной геоинформации должны быть использованы доступные в настоящее время практически для любой территории ДДЗЗ среднего пространственного разрешения, главным источником которых являются спутники проекта Landsat (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>). На сегодняшний день глобальный архив снимков Landsat содержит покрытие практически всей поверхности Земли, причем большинство регионов отсняты многократно. Кроме значений спектральных яркостей каналов снимков целесообразно использовать вычисленные на их основе тематические показатели. В качестве геоинформации о топографических факторах местности следует привлекать цифровые модели рельефа (ЦМР). Для регионального масштаба работ это, прежде всего, свободно распространяемая в настоящее время ЦМР среднего пространственного разрешения SRTM-90 (<http://srtm.csi.cgiar.org>), полученная по данным космосъемки. ЦМР могут создаваться и с использованием специальных интерполяционных алгоритмов по данным, представленным в виде изолиний высот на топографических картах различных масштабов (Савельев и др., 2005; Ермолаев и др., 2005; Мальцев, 2006). Как источник геоинформации о климатических характеристиках целесообразно использовать международную геоинформационную базу данных WorldClim (<http://www.worldclim.org>), имеющую в своем составе набор растровых слоев, на которых представлены значения климатических показателей, оцененные для суши земной поверхности. В качестве полезной информации должна рассматриваться и цифровая геоинформация

общегеографического содержания, которая на сегодняшний день доступна для многих территорий как России, так и других стран.

3.4. Представление пространственной информации в геоинформационной системе. Разработанные подходы к оценке условий экотопа используют геоинформационные технологии. В рамках их разработки и реализации все данные, как о растительном покрове, так и различные пространственно-распределенные данные, прямо или косвенно несущие информацию о факторах окружающей среды, были интегрированы в специализированной ГИС с использованием как векторной, так и растровой моделей представления пространственных данных. По уровню пространственной детализации созданная ГИС содержит информацию, соответствующую региональному масштабу исследования и представленную для территории в административных границах РТ.

3.5. Пространственная унификация и формализация данных. Вся пространственно разнородная информация о зависимых и независимых переменных была отнесена к одним и тем же операционно-территориальным единицам (ОТЕ). В рамках векторной модели данных в качестве ОТЕ взяты площадки описаний, в рамках растровой модели данных - ячейки регулярной прямоугольной сетки, полностью покрывающей территорию исследования с шагом 100 м. Результатом явилось представление всей совокупности данных в виде многомерных выборок, пригодных для дальнейшего анализа зависимостей, построения моделей и прогнозов. Ниже дан перечень использованных в работе переменных:

Зависимые переменные – факторы, описывающие условия экотопа:

Y_1 – температурный режим (термоклиматичность);

Y_2 – континентальность климата;

Y_3 – криоклиматичность;

Y_4 – увлажнение почвы;

Y_5 – кислотность почвы;

Y_6 – азотообеспеченность почвы;

Y_7 – солевое богатство почвы;

Y_8 – освещенность.

Зависимые переменные – виды флоры, зафиксированные в геоботанических описаниях изучаемой территории и имеющие описания преферендумов по шкалам Цыганова: Z_1, \dots, Z_{745} .

Независимые переменные:

X_1, X_2, \dots, X_6 – значения спектральных яркостей в каналах космоснимка;

X_7 – индекс температуры поверхности Земли (6-й канал снимка);

X_8 – индекс влажности;

X_9 – нормализованный разностный вегетационный индекс;

X_{10} – абсолютная высота;

X_{11} – крутизна склона;
 X_{12} – экспозиция склона;
 X_{13} – плановая кривизна склона;
 X_{14} – профильная кривизна склона;
 X_{15} – длина линий тока;
 X_{16} – среднегодовая температура;
 X_{17} – изотермальность;
 X_{18} – сезонные колебания температуры;
 X_{19} – максимальная температура наиболее теплого месяца;
 X_{20} – минимальная температура наиболее холодного месяца;
 X_{21} – годовой разброс температур;
 X_{22} – среднегодовые осадки;
 X_{23} – осадки в теплый период года;
 X_{24} – осадки в холодный период года;
 X_{25} – сезонные колебания осадков;
 X_{26} – признак залесенности.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ЭКОТОПА ПО ВИДОВОМУ СОСТАВУ РАСТИТЕЛЬНОГО СООБЩЕСТВА

На основе вероятностного подхода проведена формализация оценки условий экотопа (в терминах экологических шкал) по видовому составу сосудистых растений, которая выполняется с использованием информации флористической БД.

4.1. Вероятностная оценка факторов среды на основе состава фитоценоза и экологических шкал. Рассмотрим некоторый фактор среды G как дискретную случайную величину, возможные значения которой даны баллами диапазонной экологической шкалы: $\{ G_j \}$, $j=1, \dots, L$. Чтобы для некоторого экотопа i оценить распределение вероятностей значений фактора $P_{(i)}(G_j)$, воспользуемся взвешенным усреднением $P(G_j | S_m)$ - вероятностей j -го значения фактора при условии присутствия m -ого вида флоры:

$$P_{(i)}(G_j) = \frac{\sum_{m=1}^M P(G_j | S_m) w_{m,i}}{\sum_{m=1}^M w_{m,i}}. \quad (1)$$

Здесь M - общее число видов в региональном пуле видов (или общее число видов, зафиксированных в флористических описаниях исследуемой территории), $w_{m,i}$ - весовой коэффициент m -ого вида для экотопа i . Оценка (1) содержит для каждого значения шкалы ошибку относительно истинного значения вероятности. Однако, учитывая, что такие ошибки для разных видов независимы, и делая стандартное для статистики предположение о

нулевом матожидании ошибки (взаимной компенсации ошибок при суммировании по всем видам), можно рассматривать $P_{(i)}(G_j)$ как несмещенную состоятельную оценку для распределения вероятностей значений факторов среды (Савельев, 2004; Рогова и др., 2003, 2005).

Рассмотрены различные способы оценки вероятностей $P(G_j | S_i)$ и задания весов $w_{m,i}$. Первый способ оценки $P(G_j | S_i)$ исходит из предположения о равновероятности всех значений фактора в указанном для данного вида диапазоне шкалы, тогда:

$$P(G_j | S_m) = \frac{I(GL_m \leq G_j \leq GR_m)}{GR_m - GL_m + 1}. \quad (2)$$

Второй способ исходит из теоретических представлений о том, что, согласно закону толерантности (Shelford, 1913), функции отклика вида на те или иные факторы внешней среды имеют колоколообразную форму в пределах интервала толерантности вида, тогда:

$$P(G_j | S_m) = \frac{Q(G_j; GL_m, GR_m)}{\sum_{l=1}^L Q(G_l; GL_m, GR_m)}. \quad (3)$$

Здесь GL_m, GR_m – левая и правая границы диапазона толерантности m -ого вида по отношению к рассматриваемому фактору среды; $I(GL_m \leq G_j \leq GR_m)$ - индикаторная функция, $Q(G_j; GL_m, GR_m)$ - специальная функция, моделирующая с помощью гауссовой кривой на указанном для данного вида диапазоне экологической шкалы колоколообразную форму отклика.

Веса $w_{m,i}$ в формуле (1) могут быть заданы по-разному, позволяя учитывать при оценках, помимо данных о присутствии/отсутствии вида, дополнительную информацию, такую как степень обилия, или индикационная информативность вида, соответствующая степени его стенопотности по отношению к рассматриваемому фактору. В случае вероятностного описания видового состава растительного сообщества весами будут служить вероятности присутствия видов. Помимо оценки (1) рассмотрен также способ оценки вероятностей $P_{(i)}(G_j)$ по пересечению диапазонов толерантности присутствующих видов.

4.2. Оценка значений факторов среды на площадках геоботанических описаний, выполненных на территории РТ. Для видов, зафиксированных в флористических описаниях БД «ФЛОРА», были использованы описания преферендумов по шкалам Цыганова по отношению

к восьми факторам среды. Применены следующие варианты оценки распределений вероятностей значений факторов на площадках описаний:

(а) по списку присутствующих на площадке видов;

(б) по списку видов с учетом их доминантности и стенопопности;

(в) по списку видов с учетом колоколообразной формы отклика видов на факторы среды, доминантности и стенопопности видов;

(г) по пересечению диапазонов толерантности присутствующих видов.

Для каждой из 4927 площадок, где зафиксированы виды, имеющие баллы на шкалах Цыганова, получены распределения вероятностей значений каждого из рассматриваемых факторов среды по каждому из четырех вариантов оценки. С целью сравнительного анализа использованных методов оценки вероятностей, построенные распределения рассмотрены как для отдельных площадок, так и по всей выборке. Снижение дисперсии распределения в пределах одной площадки с одновременным увеличением статистических показателей вариабельности выборочных значений по всей территории указывает на то, что вариант оценки (в) дает более дифференцированные значения факторов на площадках территории исследования, лучше отражая особенности условий среды за счет видов с небольшой экологической амплитудой и моделирования колоколообразной формы отклика. Вид статистического распределения по варианту (г) плохо согласуется с градиентным изменением факторов среды. К тому же его использование становится невозможным, если экотоп недостаточно однороден и имеют место локальные вариации растительного покрова (например, площадка заложена в условиях мелкопочкарного болотного комплекса). Тогда этот вариант оценки дает пустое множество на пересечении преферендумов присутствующих видов, в то время как другие варианты, несмотря на возможную бимодальность (или многомодальность) распределения, позволяют получить оценку распределения фактора.

Сравнительный анализ показал, что способ оценки значений факторов среды с использованием подхода (в) можно считать более чувствительным как с точки зрения статистических показателей, так и с точки зрения теоретической экологии и положений индикационной геоботаники. Вероятностный подход к формализации оценки условий экотопа как вероятностного распределения значений экологических шкал позволяет описывать экологические условия местообитаний даже в случае их существенной неоднородности. Далее в работе используется именно эта оценка значений экологических факторов на площадках описаний; значения весов определяются составом и свойствами растительного сообщества площадки, зафиксированными в флористической базе данных.

ГЛАВА 5. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТООБИТАНИЙ РАСТЕНИЙ

В рамках прямого подхода оценка пространственного распределения экологических условий местообитаний растений может быть получена на основе геоинформации о «физических» характеристиках территории, которые напрямую не интерпретируются как экологические переменные, однако косвенно их представляют, находясь с ними в корреляционной зависимости. Построены статистические модели зависимостей факторов среды от характеристик территории по данным, полученным на площадках геоботанических описаний. В качестве основных статистических подходов использованы общая линейная и обобщенная аддитивная (нелинейная) модели (Hastie, Tibshirani, 1990; Guisan et al., 1998, 1999; Kienast, Zimmermann, 1999; Ермолаев и др., 2002; Wood, 2006).

5.1. Корреляционный анализ. Для обнаружения связей между экологическими факторами Y и характеристиками территории X , исследования силы и направленности этих связей был применен корреляционный анализ. Использовались как параметрические показатели связи - коэффициент корреляции и корреляционное отношение, так и непараметрический показатель - коэффициент корреляции рангов Спирмена, оцененные по выборке объема $N = 2990$ и значимые на 1%-ом уровне. Среди зависимых переменных Y_6 (азотообеспеченность почвы) и Y_3 (криоклиматичность) не коррелируют практически ни с одной рассматриваемой характеристикой территории, и, следовательно, построение моделей для них проблематично. Остальные экотопические переменные показывают достаточно хорошо выраженные и поддающиеся интерпретации связи с различными характеристиками территории.

5.2. Общая линейная модель (Mardia, 1979) является расширением линейной множественной регрессии, позволяющим включать в анализ наряду со скалярными переменными категориальные предикторные переменные и многомерные зависимые переменные, а также использовать ее при условии, что объясняющие переменные не являются линейно независимыми.

Проведено моделирование зависимостей факторов среды от характеристик территории с применением данного регрессионного метода по данным, полученным на площадках геоботанических описаний. Расчеты проводились с помощью программ, написанных в среде R. При построении моделей осуществлялся выбор наилучшего подмножества регрессоров с учетом статистической значимости вклада каждого регрессора, анализа коэффициента возрастания дисперсии (VIF) (Fox, 1992) и контроля величины информационного критерия Akaike (AIC) (Sakamoto, 1986). Ниже в качестве примера приведена полученная модель для кислотности почвы:

$$\hat{Y}_5 = 7.455 + 0.296 \times I(X_{26}) + 0.173 \times X_4 + 0.155 \times X_7 - 0.153 \times X_8 - 0.212 \times X_9 + 0.117 \times X_{19} - 0.125 \times X_{23}$$

$$\text{где } I(X_{26}) = \begin{cases} 1, & \text{если } X_{26} = 0 \\ -1, & \text{если } X_{26} = 1 \end{cases}$$

Анализ полученных моделей показал, что практически для всех факторов среды значимы такие объясняющие биоклиматические переменные, как максимальная температура наиболее теплого месяца и осадки в теплый период года, а также признак приуроченности местообитания к лесу. Также значимы характеристики, полученные с ДДЗЗ: индекс температуры поверхности Земли, индекс влажности, ближний ИК канал снимка. Из модельных характеристик рельефа значимы в качестве предикторов абсолютная высота, крутизна склона, а для фактора освещенности – экспозиция склона. Все полученные модельные соотношения согласуются с традиционными представлениями о формировании комплексов экологических факторов в рассматриваемых зональных условиях.

5.3. Обобщенная аддитивная модель. Одним из современных подходов к построению регрессии является обобщенная аддитивная модель (Austin, Meyers, 1996; Bio et al., 1998; Franklin, 1998; Leathwick, 1998; Wood, 2006). Данный метод представляет собой развитие обобщенной линейной модели, которая в свою очередь является расширением общей линейной модели. В обобщенной линейной модели линейная комбинация предикторов связывается со средним значением переменной отклика специальной монотонной функцией связи, такой, что

$$g(\mu_i) = \mathbf{X}_i^T \boldsymbol{\beta} = \sum_{j=1}^J \beta_j X_{ij},$$

где $\mu_i = E(Y_i)$, вектор \mathbf{X}_i есть i -ая строка матрицы предикторов \mathbf{X} . При этом распределение зависимой переменной может быть отличным от нормального; оно должно принадлежать экспоненциальному семейству распределений. Использование функции связи «удерживает» прогнозное значение в допустимом диапазоне при любых значениях предикторов. В обобщенной аддитивной модели линейная комбинация значений предикторов заменяется на сумму $f_j(X_{ij})$, где f_j - непараметрическая функция предиктора X_j .

$$g(\mu_i) = \sum_{j=1}^J f_j(X_{ij}).$$

Вместо коэффициентов при независимых переменных, в аддитивных моделях для каждого предиктора оценивается функция неопределенного вида, что позволяет лучше предсказать значения зависимой переменной. Метод опирается на предположения о том, что частные зависимости имеют гладкую форму и искажены случайными ошибками, вид распределения

которых известен, и что влияние различных переменных на результат аддитивно. Оценка непараметрических функций предикторов производится с использованием сплайнов (Hastie, Tibshirani, 1990; Schimek, 2000).

Для исследуемых факторов среды, описывающих экотоп, были построены обобщенные аддитивные модели зависимостей от характеристик территории. Построение моделей проводилось средствами статистического пакета R, проводился выбор наилучшего подмножества регрессоров, анализ критериев VIF и AIC. Обобщенная аддитивная модель обычно не выписывается в явном виде (в отличие от линейной) в силу того, что функции f_j представляют собой сплайны, задаваемые большим числом коэффициентов, не имеющих предметной интерпретации. Описание модели заключается в графическом представлении этих функций (частных зависимостей) для каждого из значимых предикторов X_j . Ниже (рис.1) в качестве примера приводится описание полученной модели для термоклиматичности.

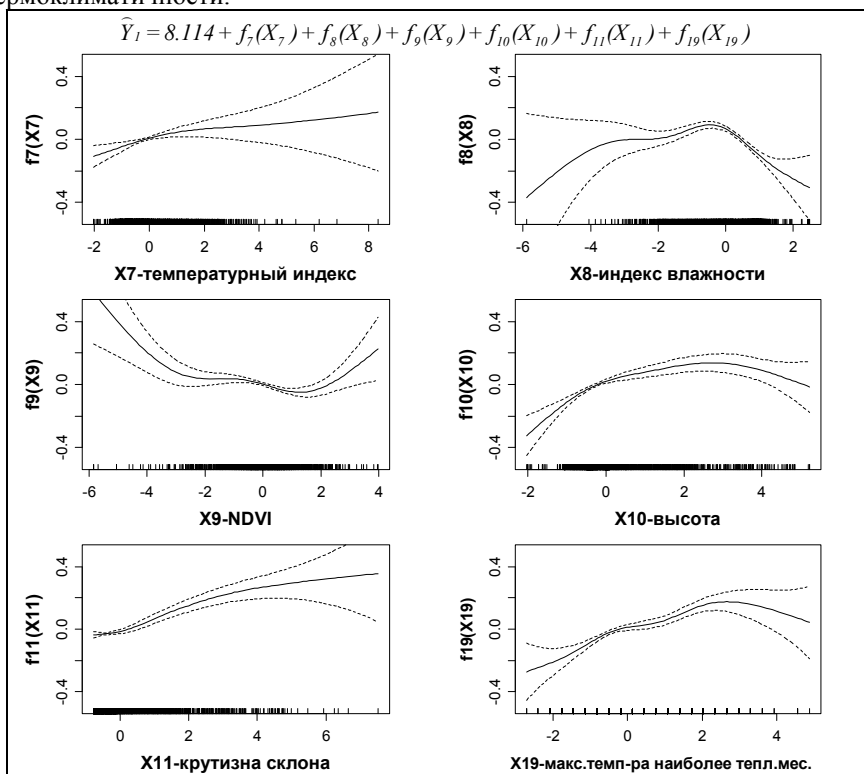


Рис. 1. Обобщенная аддитивная модель: частные зависимости термоклиматичности от характеристик территории (с доверительными интервалами)

Вид функций $f_j(X_j)$ говорит о том, что аддитивная модель позволила представить нелинейную взаимосвязь между переменными. Например, в общей линейной модели освещенности (Y_8) абсолютная высота не являлась предиктором (коэффициент корреляции, характеризующий линейную связь между переменными, равен нулю). Однако корреляционное отношение имеет достаточно высокое значение ($\eta_{yx}=0.44$), и при использовании аддитивной модели нелинейная функция $f_{10}(X_{10})$ для высоты дает значимый вклад в модель.

5.4. Оценка качества и сравнение моделей. Адекватность полученных моделей оценивалась статистически как мера соответствия модельных значений \hat{Y}_{ik} исходным данным Y_{ik} . Использовались: R^2 - коэффициент детерминации и ряд статистик, основанных на анализе остатков $e_{ik} = \hat{Y}_{ik} - Y_{ik}$. Для каждого экотопического фактора сравнение двух методов моделирования (линейного и нелинейного) показало, что, в силу нелинейности частных зависимостей, качество обобщенной аддитивной модели выше, чем линейной. Наилучшее качество показали модели для фактора солевого богатства почвы и кислотности почвы, объясняющие 65% и 54% изменчивости данных соответственно. Остальные модели также показали достаточно удовлетворительное согласие с исходными данными.

Точность прогноза солевого богатства почвы по аддитивной модели с 95%-ой доверительной вероятностью составляет ≈ 1 балл (для сравнения, размах выборочных значений составляет 5.31). По аддитивной модели с наименьшими показателями качества - для увлажнения почвы - точность прогноза с той же доверительной вероятностью составила ≈ 2 балла (размах выборочных значений - 11.97). Точность прогноза для фактора с наименьшей изменчивостью на изучаемой территории - для термоклиматичности - ≈ 0.6 балла (размах выборочных значений - 3.22). Таким образом, даже модели с наихудшими показателями обеспечивают достаточно хорошее представление фактической изменчивости данных с ошибкой прогноза порядка 20% от разброса данных.

5.5. Пространственный прогноз условий экотопа. Полученные модели служат основой для прогноза пространственного распределения значений факторов среды для исследуемой территории (Мухарамова, Яушева, 2005; Савельев и др., 2007). В ячейках унифицированной растровой сетки в границах области исследования рассчитаны два варианта прогнозных значений: на основе уравнений общей линейной модели и на основе обобщенной аддитивной (нелинейной) модели. Построенные прогнозы пространственного распределения экологических условий местообитаний (термоклиматичности, континентальности климата, увлажнения почвы, кислотности почвы, солевого богатства почвы и освещенности) визуализированы в картографическом виде и представлены в приложениях.

ГЛАВА 6. ПРОГНОЗ УСЛОВИЙ ЭКОТОПА НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПРИСУТСТВИЯ ВИДОВ

Построены статистические модели зависимостей вероятностей присутствия видов сосудистых растений от характеристик территории в рамках второго (косвенного) из предлагаемых подходов к оценке пространственного распределения экологических условий местообитаний растений. Даваемые такими моделями прогнозные вероятности присутствия видов можно использовать для оценки условий экотопа на произвольном локальном участке территории исследования с привлечением метода экологических шкал.

В качестве статистического метода для построения моделей использована логистическая регрессионная модель (Dobson, 2002). Выбор этого метода продиктован тем, что, во-первых, он является общепринятым при моделировании вероятностей присутствия/отсутствия, во-вторых, модели для растительности, построенные данным методом (Савельев, 2004; Савельев, Мухарамова, 2005) показывают качество, сравнимое с качеством моделей, реализующих другие известные методы (нейронные сети, топографическое отображение, факторный анализ экологических ниш, др.), и, наконец, возможна пакетная реализация метода, т.е. построение моделей в автоматическом режиме, что существенно, поскольку было необходимо построить модели для 745 видов флоры.

В главе приводится также оценка адекватности модельных прогнозов независимым экспертным данным. Дается сравнение результатов моделирования, полученных различными методами в рамках предлагаемых подходов. Приводится пример применения прогнозов пространственного распределения экотопических условий для прогнозирования потенциальных ареалов видов растений в пределах модельной территории.

6.1. Логистическая регрессия. Логистическая регрессия является одной из наиболее известных обобщенных линейных моделей, используемых для статистического моделирования в экологии; она применяется для бинарных и биномиальных данных и использует в качестве функции связи логит-функцию $\log(p/(1-p))$, где p - вероятность присутствия вида.

Для 745 видов флоры исследуемой территории по данным 2990 площадок геоботанических описаний построены логистические регрессионные модели, где в качестве предикторов для зависимых переменных – вероятностей присутствия видов – взяты характеристики территории. При построении моделей выбиралось наилучшее подмножество регрессоров на основе анализа статистической значимости вклада в модель каждого регрессора. В условиях выполнения индивидуалистической гипотезы совокупность полученных моделей дает вероятностное описание видового состава сосудистых растений или модель состава фитоценоза. В

качестве примера приведены оценки параметров моделей для видов, принадлежащих различным эколого-ценотическим группам: брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) (бореальный вид), ландыша майского (*Convallaria majalis* L.) (борового вид), щитовника мужского (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott.) (неморальный вид) и вероники колосистой (*Veronica spicata* L.) (лугово-степной вид).

6.2. Оценка качества моделей. Для оценки адекватности логистических моделей рассчитывалась статистика псевдо- R^2 , а также различные меры соответствия модельных результатов реальным данным на основе анализа таблиц сопряженности (Cox, Cox, 2001). Для построенных 745 моделей показатели качества соответствия (вычисленные по 2990 площадкам описаний) демонстрируют достаточно хорошие результаты для видов с различными экологическими характеристиками. Так, в качестве примера, в таблице 1 для обозначенных выше видов растений представлены значения вероятности (частоты) правильного распознавания присутствия вида (P_{mod}) и коэффициента ассоциации Юла (Q).

Таблица 1

Показатели сопряженности модельных и реальных данных

Вид Мера связи	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	<i>Convallaria majalis</i> L.	<i>Dryopteris filix- mas</i> (L.) Schott.	<i>Veronica spicata</i> L.
P_{mod}	0.874	0.829	0.845	0.685
Q	0.916	0.767	0.689	0.668

6.3. Прогноз пространственного распределения видов флоры РТ.

На основе моделей вероятностей присутствия видов получен прогнозный набор данных, дающий пространственное распределение 745 видов для территории исследования. В приложениях к работе в картографическом виде для примера представлены прогнозы для некоторых видов.

6.4. Пространственный прогноз условий экотопа на основе вероятностной модели состава фитоценоза и экологических шкал. Прогнозные вероятности присутствия видов можно использовать для оценки экологических условий местообитаний растений на произвольном локальном участке территории исследования с привлечением метода экологических шкал и формул (1), (3), где весами служат вероятности присутствия видов. Полученные таким методом пространственные прогнозы условий экотопа визуализированы в картографическом виде и представлены в приложениях к работе.

6.5. Оценка адекватности и сравнение моделей. Для оценки качества прогнозов, получаемых в рамках реализованных подходов (прямого и косвенного), может быть привлечена независимая (не участвовавшая в построении моделей) информация о поведении рассматриваемых экологических факторов на исследуемой территории. В качестве такой контрольной информации были взяты электронная ландшафтная карта РТ

(Ермолаев и др., 2005; Ермолаев и др., 2007) и электронная карта лесных формаций и лугов РТ (Рогова, Шайхутдинова, 2002). Обе карты по уровню пространственной детализации соответствуют региональному масштабу и содержат информацию, позволяющую косвенно судить о кислотности почвы, условиях освещенности, увлажнения почвы, термоклиматичности.

Так как контрольные значения представляли собой экспертно проранжированные баллы (ординальные переменные), то степень согласия с ними модельных прогнозов оценивалась с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s).

В нашем случае модельные оценки экотопических факторов содержат двойную погрешность. Одна составляющая погрешности определяется качеством построенных статистических моделей зависимостей, а другая - качеством оценки факторов на основе списков видов и экологических шкал. Поэтому проверка адекватности моделей и качества даваемых ими прогнозов на первом шаге включала проверку согласия с контрольной информацией предложенной оценки факторов на основе описаний видового состава сосудистых растений и экологических шкал (глава 4) (объем выборки 2990 – площадки описаний), а на втором шаге проверялось, как соответствуют контрольной информации прогнозные значения, получаемые с использованием построенных регрессионных моделей (главы 5, 6) (объем выборки 6 392 377 – ячейки растровой сетки). Результаты представлены в таблице 2. На рис.2 отображено соотношение модельных оценок факторов на площадках описаний с экспертными оценками: для каждого экспертного балла показаны средние значения соответствующих модельных оценок с 95%-ым доверительным интервалом.

Таблица 2

Ранговая корреляция модельных прогнозов и независимых экспертных данных

	Оценки на площадках описаний с использованием экологических шкал	r_s		
		Прогнозы на произвольном локальном участке территории		
		Общая линейная модель (прямой подход)	Обобщенная аддитивная модель (прямой подход)	Вероятностная модель состава фитоценоза (косвенный подход)
Термоклиматичность (Y_1)	0.51	0.24	0.24	0.30
Увлажнение почвы (Y_2)	0.36	0.47	0.48	0.55
Кислотность почвы (Y_3)	0.63	0.50	0.54	0.51
Освещенность (Y_8)	0.60	0.70	0.68	0.69

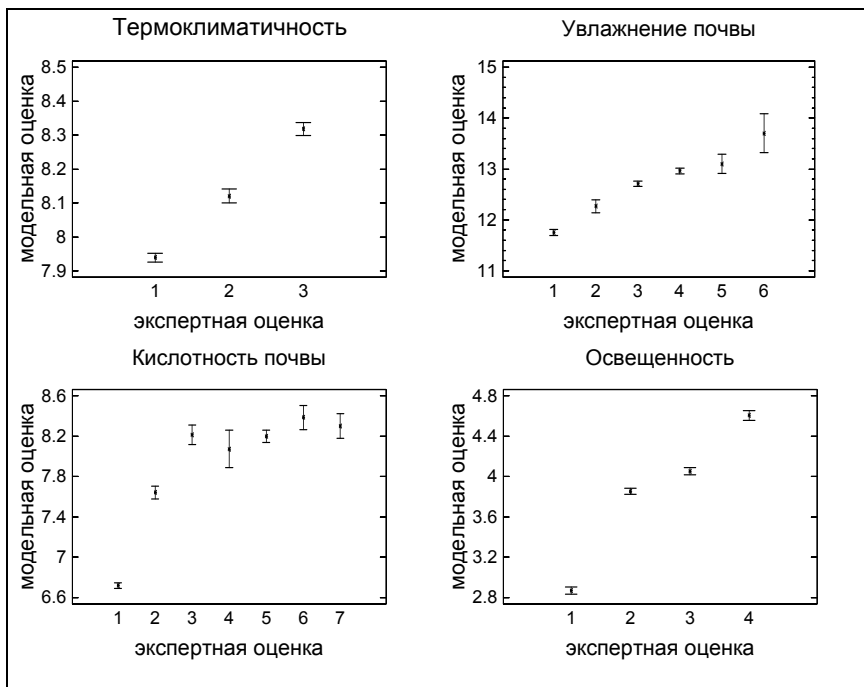


Рис. 2. Диаграммы, иллюстрирующие согласие модельных и экспертных оценок

И графики (монотонное возрастание модельных оценок с ростом экспертных оценок), и показатели корреляции указывают на достаточно хорошее согласие модельных значений факторов термоклиматичности, освещенности, кислотности и увлажнения почвы с контрольной информацией, что говорит об адекватном отображении моделями поведения исследуемых факторов на качественном уровне.

В целом модели прямого и косвенного подходов дают сопоставимые прогнозные результаты и могут применяться для оценки пространственного распределения экологических условий местообитаний растений на некоторой территории с детальностью регионального уровня. Необходимым условием для моделирования является наличие координатно-привязанных и организованных в БД геоботанических описаний, достаточно равномерно покрывающих территорию, и геоинформации о территории (ДДЗЗ, ЦМР и др.). Предпочтение должно отдаваться нелинейному методу прямого подхода, поскольку трудоемкость косвенного подхода значительно выше. На рис.3 в качестве примера приведена карта пространственного прогноза увлажнения почвы на основе обобщенной аддитивной модели.

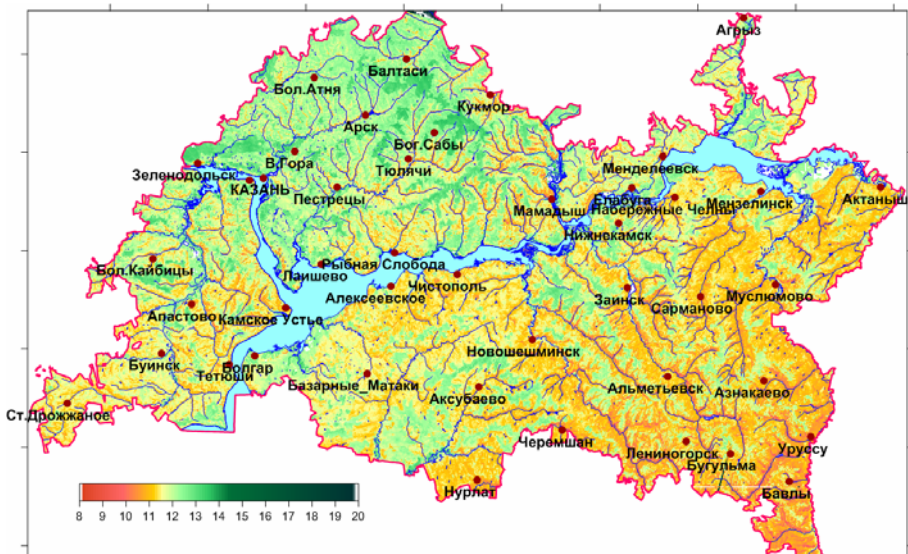


Рис.3. Прогноз пространственного распределения увлажнения почвы (в баллах шкалы Цыганова) на основе обобщенной аддитивной модели для Республики Татарстан

6.6. Применение полученных прогнозов для оценки потенциального распространения видов. Практический интерес может представлять моделирование потенциальных ареалов отдельных видов на региональном уровне в пределах исследуемой территории. Основой для этого могут служить полученные пространственные прогнозы экологических условий местообитаний растений. Статистические методы, примененные для моделирования зависимостей, дают возможность оценивать не только средние значения, но их возможную вариацию, что позволяет установить доверительные интервалы с заданной доверительной вероятностью. Пригодность локального участка географического пространства для произрастания некоторого вида обуславливается принадлежностью доверительных интервалов условий экотопа интервалам толерантности вида по каждому из факторов. В силу того, что, кроме учтенных в работе шести факторов среды, не исключается существование других лимитирующих факторов, то более правильно определять участки территории, где вид произрастать не может. Это участки, где доверительный интервал прогноза хотя бы одного из рассмотренных экотопических факторов не пересекается с интервалом толерантности вида по фактору. Подобным образом могут быть получены карты экотопических ограничений для каждого вида регионального пула.

ВЫВОДЫ

1. Для количественной оценки условий экотопа в региональном масштабе из 26 рассмотренных для территории РТ пространственно-распределенных переменных значимыми являются 10: максимальная температура наиболее теплого месяца, осадки в теплый период года, индекс температуры поверхности Земли, индекс влажности, ближний ИК канал космоснимка, нормализованный разностный вегетационный индекс, абсолютная высота, крутизна склона, экспозиция склона. Отсутствие взаимной корреляции указанных переменных и их независимое присутствие в разработанных моделях свидетельствуют о том, что предлагаемый для оценки условий экотопа набор объясняющих переменных не является избыточным.

2. Использование вероятностного подхода к оценке условий экотопа (в терминах экологических шкал) по видовому составу сосудистых растений позволяет адекватно описать экологические условия местообитаний даже в случае их неоднородности.

3. Моделирование пространственного распределения экологических условий местообитаний видов возможно с помощью двух разработанных подходов, обеспечивающих сопоставимое качество прогноза. Первый использует моделирование зависимостей экотопических факторов от пространственно-распределенных характеристик территории. Вторым (косвенный) подход использует построение вероятностных списков видов по пространственно-распределенным характеристикам территории с последующей оценкой по ним экотопических факторов. В рамках этих подходов применение статистического метода, известного как обобщенная аддитивная модель, позволяет создать количественные модели пространственного распределения экологических условий местообитаний растений.

4. Построенные модели пространственного распределения экологических условий местообитаний обеспечивают оценку факторов среды с приемлемой точностью и адекватны в смысле согласия модельных прогнозов с независимыми экспертными данными и имеющимися экологическими картами: наибольшее значение коэффициента ранговой корреляции равно 0.7 (для освещенности), наименьшее – 0.3 (для термоклиматичности). Все коэффициенты корреляции значимы на 1%-ом уровне.

5. Использование разработанных подходов и математических моделей позволяет получать оценку экотопических условий на больших территориях в автоматическом режиме на основе имеющихся геокодированных списков видов растений и общедоступной геоинформации, полученной дистанционным путем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

1. Мухарамова С.С. Математическая модель экосистемы рыбоводного пруда / С.С. Мухарамова // Казанский медицинский журнал. – 1992. - Т.73. - № 4. – С. 276-279.
2. Saveliev A.A. Modeling of the Daily Rainfall Values Using Surface Under Tension and Kriging / A.A. Saveliev, S.S. Mucharamova, G.A. Piliugin // J. Geogr. Inf. and Decis. Anal. - 1998. - V.2. - №2. - P.52-64.
3. Rogova T. Effect of Landscape fragmentation on Coniferous-Broadleaved Forests / T.Rogova, A.Saveliev, S.Mukcharamova // Journal of Vegetation Science. - Vol. Conference Proceedings 41 symposium IAVS. - Sweden, 2000. - P.174-177.
4. Ермолаев О.П. Ландшафтный подход при построении математико-статистических моделей природно-антропогенной эрозии в Среднем Поволжье / О.П. Ермолаев, С.С. Мухарамова, Д.А. Биктимирова // Труды Международ. научно-практич.конф. «Современные проблемы земледелия и экологии», Курск 10–12.09.2002 г. – Курск: РАСН-ВНИИЗиЗПЭ, 2002. - 5 с.
5. Ермолаев О.П. Подходы к районированию рельефа на основе его морфометрических показателей с использованием искусственных нейронных сетей / О.П. Ермолаев, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, К.А. Мальцев // Труды XII съезда Русского географического общества, (Кронштадт, 2005). - Т.4. – С.П.: Изд-во НОУ «Школа «Эпиграф», 2005. – С.348-356.
6. Рогова Т.В. Вероятностная модель формирования флористического состава растительных сообществ / Т.В. Рогова, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова // Ботанический журнал. - 2005. - Т.90. - №3. - С.450-460.
7. Савельев А.А. Методы самоорганизации для выделения и картографического отображения тематических категорий в геоинформационных системах / А.А. Савельев, О.П. Ермолаев, С.С. Мухарамова, К.А. Мальцев // Исследования по прикладной математике и информатике. - Вып.25. – Казань: Изд-во Казанского госуниверситета, 2005. – С.72-82.
8. Saveliev A.A. Automated mapping using multilevel B-Splines / A.A. Saveliev, A.V. Romanov, S.S. Mukcharamova // Applied GIS. – 2005. – V.1. - № 2. – P. 17-01 -17-19.
9. Ермолаев О.П. Создание первой очереди геоинформационной системы "Природопользование" в рамках системы "Электронное правительство Республики Татарстан" / О.П. Ермолаев, С.С. Мухарамова, А.А. Савельев, А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижикова, Ю.П. Бубнов, А.И. Гаязов, С.Р. Яшуева // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием "Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований", том 3. - Казань: Бриг, 2009. - С. 5-9.
10. Мухарамова С.С. Автоматизированное дешифрирование элементов земного покрова по космическим снимкам Landsat с использованием программы eCognition / С. С. Мухарамова, А. Г. Пилюгин // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием "Окружающая среда и

устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований", том 3. - Казань: Бриг, 2009. - С. 75-79.

Монографии:

11. Saveliev A.A. Analysis and modelling of lattice data / A.A. Saveliev, S. S. Mukharamova, A.F. Zuur // *Analysing Ecological Data* / A.F. Zuur, E.N. Ieno, G. M. Smith. - Springer-Verlag, 2007a. - Chapter 18. - P.321-338. - 672 p.
12. Saveliev A.A. Spatially continuous data analysis and modelling / A.A. Saveliev, S.S. Mukharamova, N.A. Chizhikova, R. Budgey, A.F. Zuur // *Analysing ecological data* / A.F. Zuur, E.N. Ieno, G.M. Smith. - Springer-Verlag, 2007b. - Chapter 19. - P. 341-372. - 672 p.
13. Rogova T.V. Spatial modelling of forest community features in the Volzhsko-Kamsky reserve / T. V. Rogova, N. A. Chizhikova, O. E. Lyubina, A. A. Saveliev, S. S. Mukharamova, A. F. Zuur, E. N. Ieno, G. M. Smith // *Analysing ecological data* / A. F. Zuur, E. N. Ieno, G. M. Smith. – Springer-Verlag, 2007. – Chapter 37. – P. 633-648. - 672 p.

Тезисы докладов:

14. Рогова Т.В. Формирование и ведение кадастра флористического разнообразия в составе региональной ГИС / Т.В.Рогова, В.Е.Прохоров, С.С.Мухарамова // Информационно-поисковые системы в зоологии и ботанике. – СПб.: ЗИН РАН, 1999. – С. 92-93.
15. Рогова Т.В. Вероятностная модель образования растительных сообществ и моделирование пространственного распределения растительности / Т.В. Рогова, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова // Международный симпозиум "Информационные системы по биоразнообразию видов и экосистем", 1-4 декабря 2003 г., Сборник тезисов. - СПб: ЗИН РАН, 2003. - С.64.
16. Ермолаев О.П. Создание эколого-геоинформационной системы региона / О.П. Ермолаев, В.А. Белоногов, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, Н.П. Горсуев // Современные аспекты экологии и экологического образования. Материалы Всеросс. научной конференции (Казань, 19-23 сентября 2005 г.) – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2005. - С.5-7 стр.
17. Ермолаев О.П. Автоматизированное построение ландшафтных карт с использованием нейронных сетей / О.П. Ермолаев, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, Е.А. Цишейко // Современные аспекты экологии и экологического образования. Материалы Всеросс. научной конференции (Казань, 19-23 сентября 2005 г.) – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2005. - С.346-347.
18. Мухарамова С.С. Моделирование пространственного распределения факторов среды на основе ДДЗ с использованием экологических шкал Цыганова / С.С. Мухарамова, С.Р. Яушева // Современные аспекты экологии и экологического образования: Материалы Всеросс. научной конференции (Казань, 19-23 сентября 2005 г.) – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2005. – 3 с.
19. Савельев А.А. Моделирование пространственной структуры растительного покрова / А.А.Савельев, С.С. Мухарамова // Современные аспекты экологии и экологического образования. Материалы Всероссийской научной

конференции (Казань, 19-23 сентября 2005 г.) - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2005. - С.542-543.

20. Рогова Т.В. Методические подходы составления региональных биоиндикационных экологических шкал на основе непрямого градиентного анализа / Т.В. Рогова, С.С.Мухарамова, Б.Р. Шагиев, А.Ю. Биншток // Актуальные экологические проблемы РТ. Тез.докл.VII респ. научн. конф. – Казань: «Отечество», 2007. – 2 с.
21. Савельев А.А. Пространственная оценка экологических факторов при геоситуационном анализе территорий по данным дистанционного зондирования Земли / А.А.Савельев, С.С.Мухарамова, А.Г. Пилюгин // Геоситуационный анализ: Материалы докладов Международной научной конф. – Казань: Издат.дом «Медок», 2007. - 3 с.

Учебно-методические разработки:

22. Мухарамова С.С. Основы геостатистического анализа и моделирования в экологии. Учебно-методическая разработка / С.С.Мухарамова, А.А.Савельев, А.Г.Пилюгин. - Казань: Лаборатория оперативной полиграфии КГУ, 2002а. – 38 с.
23. Мухарамова С.С. Геостатистический анализ данных в экологии. Учебно-методическая разработка / С.С.Мухарамова, А.А.Савельев, А.Г.Пилюгин. - Казань: Лаборатория оперативной полиграфии КГУ, 2002б. – 54 с.
24. Савельев А.А. Пространственный анализ в растровых геоинформационных системах. Учебно-методическая разработка / А.А. Савельев, С.С.Мухарамова, А.Г. Пилюгин. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. - 30 с.
25. Савельев А.А. Использование языка R для статистической обработки данных. Учебно-методическая разработка / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. - 30 с.
26. Савельев А.А. Основные понятия языка R. Учебно-методическая разработка / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, А.Г. Пилюгин. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. – 30 с.