

УДК 528.94:630*1

ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ГЕОЭКОЛОГИИ

Л.С. Шарая

*Институт экологии Волжского бассейна РАН
Россия, 445003, Тольятти, Комзина, 10
E-mail: L_Sharaya@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.07.08 г.

Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии. – Шарая Л.С. – Предсказательные карты ряда характеристик лесных экосистем были рассчитаны на основе выявленных статистически значимых связей с абиотическими факторами. Последние служили предикторами для интерполяции и экстраполяции измеренных характеристик на всю занимаемую лесом территорию. Проведено сравнение функциональных параметров экосистем смешанных лесов и лесостепи, представлены их предсказательные карты, которые содержат значения в каждом своем элементе. Обсуждаются закономерности пространственных изменений свойств лесных массивов в разных природно-климатических зонах, рассмотрены критерии применимости этого подхода.

Ключевые слова: предсказательное картирование, лесная экосистема, абиотические факторы, фитоценоз, геоморфометрия.

Predictive mapping of forest ecosystems in geoecology. – Sharaya L.S. – Predictive maps of several features of forest ecosystems were calculated on the basis of statistically significant interrelationships between these features and abiotic factors. The latter ones serve as predictors for interpolation and extrapolation of the measured characteristics to the whole territory covered with forest. The functional parameters of ecosystems are compared for mixed forests and forest-steppe, their predictive map images are presented that contain the corresponding values at each grid point. Interrelationships in the spatial variability of forest ecosystems are discussed, and applicability criteria of this approach are considered.

Key words: predictive mapping, forest ecosystem, abiotic factors, phytocenosis, geomorphometry.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно известному определению К. Тролля (Troll, 1971), *геоэкология*, или ландшафтная экология, есть «изучение главных сложных причинно-следственных связей между живыми сообществами и окружающей средой», которое «выражается регионально в определенном узоре распределения (ландшафтная мозаика, ландшафтный узор)». В то же время в сплошных лесных массивах закономерности этого узора для различных характеристик экосистемы остаются невидимыми для исследователя из-за практической невозможности измерений их на десятках или сотнях тысячах тестовых площадок. По той же причине многолетний сбор данных в лесоведении по выделам и кварталам нередко ограничен довольно простыми показателями (запас древесины, продуктивность эдификаторов).

Изучению связей внутри лесных экосистем разных уровней посвящен большой ряд экспериментальных и концептуальных исследований отечественной шко-

лы ландшафтоведения (Арманд, 1975; Сочава, 1975; Крауклис, 1979; Исаченко, 2001, Коломыц, 2008 и др.). Однако только с развитием географических информационных систем (ГИС) стал возможен расчет самих карт биотических характеристик экосистем на основе их связи с абиотическими факторами, такими как характеристики рельефа или данные космоснимков. Постепенно некоторые способы интерполяции и экстраполяции измеренных характеристик в ГИС были осознаны как весьма перспективные для почвоведения, геоботаники и геоэкологии. Начиная примерно со времени опубликования обзора (Scully et al., 2003) по использованию этого подхода в почвоведении, где явно определен термин «предсказательное картирование» (predictive mapping), этот термин быстро нашел признание также в геоботанике (Lees et al., 2006) и стал все чаще употребляться в экологии (Dullinger et al., 2005; MacMillan et al., 2007; Jones et al., 2008). В последнем случае, скорее, как противопоставляемый различным динамическим или пространственно-временным моделям.

А.В. McBratney с соавторами (2000) в обзоре отмечает, что среди различных переменных окружающей среды наиболее диагностически ценными оказываются характеристики рельефа. Наука о количественном анализе рельефа – геоморфометрия, попытки развития которой предпринимались и отечественными исследователями (Ласточкин, 1987, 1991; Симонов, 1998; Пузаченко и др., 2002), получила в последние годы существенное развитие. Число определяемых в каждой точке количественных характеристик рельефа возросло от шести до 18-ти, описан также физический смысл каждой из этих *морфометрических величин* (МВ) (Shary et al., 2002). Такое изменение в настоящее время позволяет более полно описывать различные аспекты действия рельефа как интегративного абиотического фактора, являющегося перераспределителем влаги, тепла и света, и выявлять причины, приводящие к формированию пространственных узоров в экосистемах.

Целью работы является описание возможностей предсказательного картирования лесных экосистем, установление некоторых критериев применимости подходов этого рода, а также изучение закономерностей пространственной изменчивости экосистем разных природно-климатических зон при использовании расширенного набора МВ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования явились лесные экосистемы Жигулевского низкорного массива и Приокско-Террасного заповедника (ПТЗ). Первый находится близ южной границы лесостепи в условиях контрастного гидротермического режима, обусловленного особенностями рельефа (Шарая, 2007), и высокого контраста почв (Гагарина, Абакумов, 2004), второй – в подзоне смешанных хвойно-широколиственных лесов в значительно менее контрастных условиях рельефа и почв Москворецкой равнины. Каждая из этих экосистем представляет собой сплошной лесной массив, поэтому вопросы, связанные со спецификой фрагментированных на «островки» лесов (например, с различием эдификаторов в разных островках леса), в настоящей работе не рассматриваются.

В изучаемых лесных экосистемах измерения экологических факторов проводились на 40 – 45 тестовых площадках размером 20 × 20 м каждая, методики и из-

мерявшиеся характеристики экосистем описаны в работе Э.Г. Коломыца (2008). Данные о высотах земной поверхности экосистемы Жигули взяты из проекта SRTM НАСА, аналогичные данные для экосистемы ПТЗ – из топографических карт, затем преобразованы в матрицы высот в проекции Гаусса – Крюгера с шагом решетки 50 м для экосистемы Жигули и 20 м для экосистемы ПТЗ. Матрицы были использованы для расчета всех морфометрических величин по методикам, описанным в работе Р.А. Шары с соавторами (2002) и для построения карт в программе «Аналитическая ГИС Эко» (Шарый, 2006 а). В работе рассчитывались карты характеристик экосистем, но на рисунках они представлены в виде карты-схем.

Согласно определению (Scull et al., 2003), предсказательное картирование есть разработка вычислительной или статистической модели взаимосвязи между переменными окружающей среды и характеристиками экосистемы, которая затем применяется к географической базе данных для создания предсказательной карты. Для этих целей обычно используется множественная регрессия. В работе N.J. McKenzie, P.J. Ryan (1999) отмечено, что не так важен конкретный вид статистики, как введение и использование новых диагностически ценных переменных окружающей среды.

В настоящей работе использовалась линейная множественная регрессия вида

$$X = a \cdot MB_1 + b \cdot MB_2 + c \cdot MB_3 + d, \quad (1)$$

где X – характеристика экосистемы, MB_1 , MB_2 и MB_3 – три линейно независимые морфометрические величины, a , b , c , d – вычисляемые из сравнения измеренных значений X и рассчитанных значений MB коэффициенты регрессии. Методика решения уравнения (1) описана, например, в работе D.C. Montgomery, E.A. Peck (1982).

В используемом подходе расчет осуществляется для всех троек линейно независимых MB из 18-ти, и выбирается тройка MB , для которой найдено самое большое значение рангового коэффициента корреляции Спирмана r_s . На практике может использоваться не весь набор 18-ти MB , поскольку некоторые из них, такие как полные кривизны, могут давать нереалистичные всплески вблизи мест резкого изменения крутизны (у краев речных долин и др.), что делает регрессию аналогичной пошаговой. Этот подход позволяет выделять наилучшие предикторы из общего списка MB . Дополнительно нормирование каждой MB на диапазон от 0 до 1 в уравнении (1) позволяет оценивать вклад каждой из трех MB по относительным значениям коэффициентов регрессии a , b , c (Tomer, Anderson, 1995). Уравнения регрессии ниже даны именно в таком виде.

Полный список MB с описанием смысла каждой приведен в работах Р.А. Шары с соавторами (2002), П.А. Шарого (2006); в таблице даны обозначения и краткое описание используемых в описании результатов MB из этого списка.

Н.М. Сибирцев (Почвоведение..., 1951) первый отметил, что терморезим склонов характеризуется в первую очередь перпендикулярностью падения солнечных лучей на земную поверхность, зависящей как от крутизны, так и от экспозиции склонов. Освещенность является прямой характеристикой этой перпендикулярности (она равна 100% для перпендикулярного падения лучей и 0% для теневых склонов), в то время как экспозиция склонов характеризует ее частично: крутые южные склоны прогреваются значительно сильнее, чем пологие.

Обозначения, названия и смысл морфометрических величин

МВ, обозначение	Что описывает
Крутизна, GA	Скорость потоков
Освещенность, $F(a, b)^*$	Интенсивность прямого солнечного излучения
Высота, Z	Изменение температуры и давления атмосферы
Вертикальная кривизна, kv	Выпуклость профиля склона
Площадь сбора, MCA	Суммирует сближающиеся в плане потоки
Полная аккумуляционная кривизна, KA	Зоны относительной аккумуляции и сноса
Полная кольцевая кривизна, KR	Расчлененность (изрезанность) рельефа
Горизонтальная избыточная кривизна, khe	Эти две МВ расщепляют расчлененность рельефа на горизонтальную и вертикальную компоненты
Вертикальная избыточная кривизна, kve	

* Освещенность зависит от двух углов: a – склонение от горизонта, b – азимут Солнца, отсчитываемый от севера по часовой стрелке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

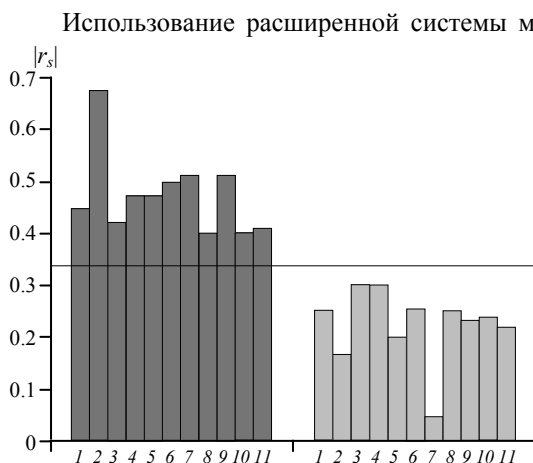


Рис. 1. Сравнение тесноты статистической связи характеристик экосистемы с рельефом при использовании хорошо известной крутизны (справа) и расширенного набора МВ (слева). Горизонтальная черта обозначает уровень значимости $P = 0.05$; столбики ниже этой черты отвечают статистически незначимой корреляции, выше – значимой. Характеристики экосистемы Жигули: 1 – гранулометрический состав почв, 2 – тип местоположения, 3 – мощность гумусового горизонта, 4 – бонитет лесного фитоценоза, 5 – средняя высота подроста, 6 – средняя высота подростка, 7 – количество подростка лиственных пород, 8 – общая надземная масса подроста и подростка, 9 – зеленая масса напочвенного покрова, 10 – отношение продуктивности к фитомассе, 11 – коэффициент годичного оборота фитомассы

Использование расширенной системы морфометрических величин (МВ) позволяет не только полнее описать рельеф, но и обнаруживать статистически достоверные связи между характеристиками экосистемы и МВ там, где они ранее не обнаруживались (рис. 1).

Предсказательные карто-схемы годичного прироста стволовой древесины для экосистем ПТЗ и Жигули показаны на рис. 2, 3.

Уравнение регрессии для прироста древесины в экосистеме ПТЗ имеет вид

$$X = 4.59 \cdot kv + 4.04 \cdot F(35.210) + 0.93 \cdot MCA - 0.83 \quad (r_s = 0.54; P < 10^{-3}), \quad (2)$$

а уравнение регрессии для прироста древесины в экосистеме Жигули –

$$X = 4.65 \cdot Z - 2.53 \cdot F(35.260) - 2.00 \cdot kv + 0.68 \quad (r_s = 0.76; P < 10^{-6}). \quad (3)$$

Согласно уравнениям (2) и (3), ведущими предикторами для прироста стволовой древесины в равнинной экосистеме ПТЗ оказываются вертикальная кривизна и освещенность, а в низкорослой экосистеме Жигули – высота и освещенность. Недостаток влаги в экосистеме Жигули приводит к

увеличенному приросту древесины в гидроморфных участках местности, в то время как противоположная тенденция (прирост увеличен в автоморфных участках) прослеживается для гумидных условий экосистемы ПТЗ. В свою очередь, гидроморфизм почв связан с определенными МВ, такими как описывающие поверхностный сток вертикальная кривизна (Troeh, 1964) и площадь сбора (Martz, de Jong, 1988) и описывающая терморегим склонов освещенность (McKenzie, Ryan, 1999). Отмеченной противоположности тенденций как раз и отвечают противоположные знаки при вертикальной кривизне и освещенности в уравнениях регрессии (2) и (3).

Вогнутым участкам профиля склона ($k_v < 0$) отвечает большее увлажнение, чем выпуклым (Шарый, 2006 б), а потому знак коэффициента регрессии при k_v отрицателен для тяготеющих к гидроморфным участкам экосистемы Жигули (прирост стволовой скелетной древесины увеличен) и положителен – для экосистемы ПТЗ с обратной тенденцией.

Зависимость коэффициента корреляции r_s от склонения Солнца в освещенности оказывается весьма слабой практически для всех характеристик экосистем, однако r_s существенно возрастает для ряда характеристик экосистем при юго-западном азимуте Солнца. Это явление, отмечавшееся еще Н.М. Сибирцевым (Почвоведение..., 1951), связано с тем, что наиболее существенный прогрев корнеобитаемого слоя почв и пород наступает несколько позднее полудня (поскольку на проникновение тепла в глубь почвы требуется время), и потому в уравнениях регрессии (2) и (3) более тесная связь наблюдалась для юго-западного азимута. В целом связь различных характеристик экосистемы с азимутот неодинакова, и для ряда характеристик может наблюдаться более тесная связь с юго-восточным азимутот. По-видимому, это

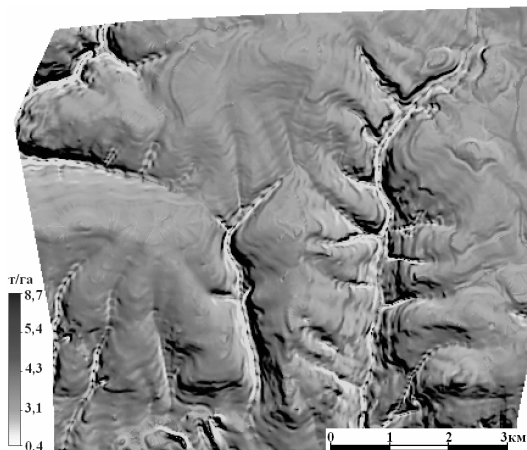


Рис. 2. Карто-схема годичного прироста стволовой скелетной древесины для экосистемы Приокско-Террасного заповедника

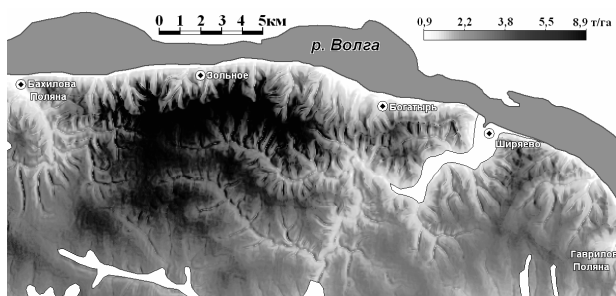


Рис. 3. Карто-схема годичного прироста стволовой скелетной древесины для экосистемы Жигули. Белым цветом показаны участки без леса

связано с тем, что отклонения от южного азимута различны для разных времен года (Почвоведение..., 1951). Например, для температуры почвы на глубине 30 см (измерявшейся в 11 – 12 часов в первой половине июля) наблюдалось увеличение r_s для юго-восточного положения Солнца (рис. 4.)

Уравнение регрессии для этого абиотического экологического фактора имеет вид

$$X = 2.63 \cdot GA - 2.45 \cdot KA + 0.79 \cdot F(35.135) + 11.55 \quad (r_s = 0.76; P < 10^{-6}). \quad (4)$$

Юго-восточному азимуту здесь отвечает наибольшее значение r_s потому, что

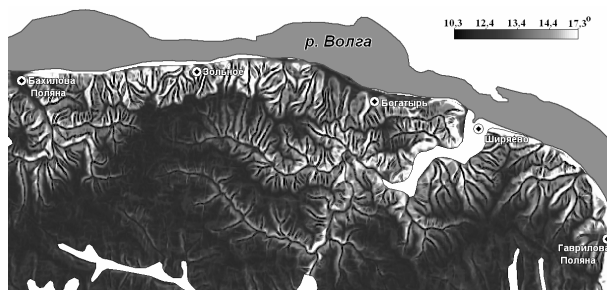


Рис. 4. Карто-схема температуры почвы на глубине 30 см для экосистемы Жигули

до полудня успевают прогреться лишь юго-восточные склоны.

Предсказательные карты ряда других абиотических характеристик экосистемы Жигули (типы местоположения, гранулометрический состав почв, запасы влаги) описаны автором ранее (Шарая, 2007). Карто-схемы пространственного распределения массы лес-

ной подстилки для экосистем Жигули и ПТЗ показаны на рис. 5, 6. Уравнение регрессии для экосистемы Жигули в этом случае имеет вид

$$X = 22.3 \cdot GA + 18.7 \cdot F(35.130) - 10.7 \cdot MCA + 1.7 \quad (r_s = 0.73; P < 10^{-6}), \quad (5)$$

для экосистемы ПТЗ –

$$X = -26.5 \cdot GA - 17.7 \cdot MCA + 16.7 \cdot F(35.160) + 32.5 \quad (r_s = 0.56; P < 10^{-3}). \quad (6)$$

Ведущими предикторами в экосистеме ПТЗ оказываются важнейшие в теории водной эрозии МВ – крутизна и площадь сбора, в то время как в экосистеме Жигули одним из двух ведущих предикторов оказывается освещенность, т.е. характеристика терморегима склонов. В гумидных условиях ПТЗ масса лесной подстилки уменьшается с ростом крутизны, что вызвано, по-видимому, существенным разви-

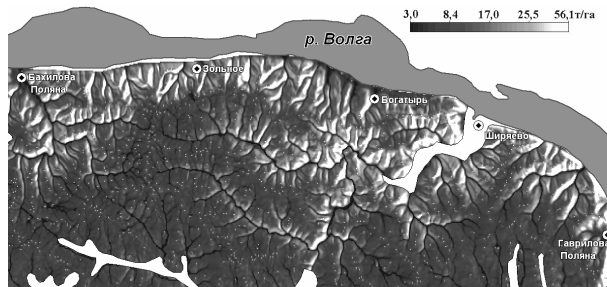


Рис. 5. Карто-схема массы лесной подстилки для экосистемы Жигули

тием здесь эрозионных процессов, в то время как в условиях недостатка влаги в экосистеме Жигули (где нет рек) масса лесной подстилки увеличивается с ростом крутизны.

Отметим, что в моделировании водной эрозии заметные сдвиги произошли при замене «универсального уравнения эрозии», исполь-

зовавшего длину склона (не имеющую существенного физического смысла, так как не описывает ни форму склона, ни особенностей гидрологических процессов) на модифицированное уравнение с площадью сбора (Moore et al., 1991).

Рассмотрим некоторые критерии применимости методов предсказательного картирования. Уже из самой сути этих методов как индикационных следует, что обязательным условием их применимости является статистическая достоверность связи между данной характеристикой экосистемы и характеристиками рельефа (и/или другими данными, такими как космоснимки). Используемое в парных статистических сравнениях критическое значение $P = 0.05$ вряд ли следует механически переносить на предсказательное картирование, поскольку существующую здесь вероятность столкнуться с неизученными отклонениями в материнских и других породах нельзя *a priori* считать малой. По-видимому, $P < 10^{-3}$ здесь можно было бы рассматривать как более приемлемый уровень значимости.

Изучаемый физико-географический регион должен быть в достаточной мере пространственно однороден по условиям формирования, а не состоять, например, наполовину из базальтовой плиты и наполовину – из осадочных отложений. Эта однородность условий формирования устанавливается обычно геологическими и другими обследованиями местности, но обычно все же не выполняется для весьма протяженных регионов, таких как бассейн р. Волги, в пределах которого мощность осадочных отложений меняется от нескольких десятков метров близ Воронежского щита до нескольких километров в Самарской области. Представленные выше сравнения двух находящихся в различных климатических и геологических условиях экосистем показывают разные знаки коэффициентов регрессии, так что механический перенос полученных для одной экосистемы коэффициентов регрессии на другую хотя технически чрезвычайно прост (и доступен в используемой программе), но дает нереалистичные результаты.

Выбор площадок исследования для измерения характеристик экосистемы должен осуществляться таким образом, чтобы в нем были учтены все основные различные относительные положения в ландшафте – от элювиальных до аллювиальных. В противном случае найденные при недостаточно полном учете этих местоположений статистические связи (коэффициенты регрессии) будут неполно характеризовать экосистему и могут привести к нереалистичным результатам предсказательного картирования. В почвоведении, где есть возможность осуществ-

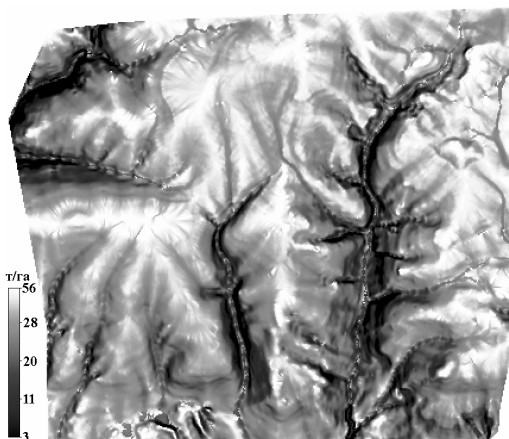


Рис. 6. Карто-схема массы лесной подстилки для экосистемы Приокско-Террасного заповедника

влять измерения на сотнях площадок, около 10% от их числа не используется в регрессии, но используется для верификации – выборочной проверки качества результатов предсказательного картирования по известным статистическим критериям (McBratney et al., 2000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая неосуществимость массовых измерений характеристик лесных экосистем делает перспективным использование абиотических переменных среды, таких как характеристики рельефа, для получения количественных предсказательных карт, где в каждом элементе содержится число – значение характеристики экосистемы.

Сравнение результатов предсказательного картирования для двух неодинаковых по условиям формирования лесных экосистем выявило существенные различия в организации пространственных узоров изучавшихся характеристик экосистем, которые связаны с различием климатических условий и выражаются в разном отклике характеристик этих экосистем на изменения гидротермических условий.

Использование расширенного набора морфометрических величин с явно описанным физическим смыслом позволяет выявлять статистически значимые связи в условиях, в которых они ранее не обнаруживались. Методы нелинейной множественной регрессии могли бы позволить в большей степени выявить эффекты совместного действия различных абиотических факторов при изучении взаимосвязей и решении задач предсказательного экологического картирования.

Автор признателен профессору Э.Г. Коломыц за любезно предоставленные данные полевых исследований по лесным экосистемам и П.А. Шарому за возможность использовать программу «Аналитическая ГИС Эко» и обсуждение результатов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 287 с.
- Гагарина Э.И., Абакумов Е.В. Перспективы почвенных исследований в Жигулевском заповеднике // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2004. Спецвып. «Природное наследие России», ч. 1. С. 158 – 164.
- Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 328 с.
- Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
- Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 232 с.
- Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.
- Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности (принципы и методы статической геоморфологии). Л.: Недра, 1991. 340 с.
- Почвоведение – курс лекций, читанных студентам Института сельского хозяйства и лесоводства в Новой Александрии // Сибирцев Н.М. Избр. соч.: В 2 т. Т. 1. Почвоведение. М.: Сельхозгиз, 1951. 472 с.
- Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М. Количественные методы классификации форм рельефа // Изв. РАН. Сер. географ. 2002. №6. С. 17 – 25.

ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

- Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. Смоленск: Изд-во Смолен. гос. ун-та, 1998. 272 с.
- Сочава В.Б. Учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 40 с.
- Шарая Л.С. Количественный анализ пространственной изменчивости некоторых параметров состояния экосистемы Жигули // Бюл. «Самарская Лука». 2007. Т. 16, №4. С. 639 – 659.
- Шарый П.А. ECOGIS // ESTI MAP – официальный представитель PB MapInfo в России и странах СНГ [Электронный ресурс]. М., 2006 а. Режим доступа: http://www.esti-map.ru/Программное_обеспечение/ECOGIS/tabid/89/Default.aspx. 11.06.2009.
- Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о Земле и экологии: обзор методов и приложений // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2006 б. Т. 8, №2. С. 458 – 473.
- Dullinger S., Dirnböck T., Köck R., Hochbichler E., Englisch T., Sauberer N., Grabherr G. Interactions among tree-line: differential effects of pine on spruce and larch // J. of Ecology. 2005. Vol. 93. P. 948 – 957.
- Jones M.M., Tuomisto H., Olivas P.C. Differences in the degree of environmental control on large and small tropical plants: just a sampling effect? // J. of Ecology. 2008. Vol. 96, №2. P. 367 – 377.
- Lees B.G., Van Niel K.P., Laffan S.W. Predictive vegetation mapping and DEM error // Intern. Symp. on Terrain Analysis and Digital Terrain Mapping (TADTM 2006): Proceedings of TADTM 2006. Nanjing, China, 2006. P. 42 – 45.
- MacMillan R.A., Torregrosa A., Moon D., Coupe R., Philips N. Automated predictive mapping of ecological entities // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / Eds. T. Hengl, H.I. Reuter. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. Chapter 27. P. 457 – 477.
- Martz L.W., Jong E. de. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers and Geosciences. 1988. Vol. 14, № 5. P. 627 – 640.
- McBratney A.B., Odeh I.O.A., Bishop T.F.A., Dunbar M.S., Shatar T.M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey // Geoderma. 2000. Vol. 97, № 3 – 4. P. 293 – 327.
- McKenzie N.J., Ryan P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation // Geoderma. 1999. Vol. 89, № 1 – 2. P. 67 – 94.
- Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. 1991. Vol. 5. P. 3 – 30.
- Scull P., Franklin J., Chadwick O.A., McArthur D. Predictive soil mapping: a review // Progress in Physical Geography. 2003. Vol. 27, № 2. P. 171 – 197.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107, № 1 – 2. P. 1 – 32.
- Tomer M.D., Anderson J.L. Variation of soil water storage across a sand plain hillslope // Soil Science Society of America Journal. 1995. Vol. 59, № 4. P. 1091 – 1100.
- Troeh F.R. Landform parameters correlated to soil drainage // Soil Science Society of America Proceedings. 1964. Vol. 28, № 6. P. 808 – 812.
- Troll C. Landscape ecology (geocology) and biogeocenology – a terminology study // Geoforum. 1971. Vol. 8. P. 43 – 46.