

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ЖИГУЛИ

Показано, что ведущими предикторами, определяющими пространственную изменчивость изучавшихся характеристик экосистемы, чаще всего выступают совместно гидрологически важная площадь сбора, описывающая терморегим склонов освещенность и связанная с эрозионно-денудационным сносом крутизна склонов. На основе выявленных статистических связей рассчитаны матрицы некоторых характеристик экосистемы, из которых сформированы карты. Методами геоморфометрии показано, что Самарская Лука представляет самостоятельную геометрическую структуру 1-го континентального иерархического уровня, характеризующуюся сравнительно низким базисом эрозии и существенно большей пространственной контрастностью гидротермических условий.

Ключевые слова: предсказательное экологическое картирование, геоморфометрия, морфометрическая величина, ландшафтные связи, непараметрическая статистика.

### **Sharaya L.S. QUANTITATIVE ANALYSIS OF SPATIAL VARIABILITY TO CHARACTERIZE SOME PARAMETERS OF 'ZHIGULI' ECOSYSTEM STATE**

Is shown, that conducting predictors, determining spatial variability are learning of the characteristics ecosystems, act in common hydrology the important area of the tax describing thermo mode of slopes light exposure and connected with erosion-denudation destruction a steepness of slopes more often. On the basis of the revealed statistical communications the matrixes of some characteristics ecosystem are designed, from which the maps are generated. By methods geomorphometrics is shown, that of the Samara Onion represents independent geometrical structure of 1-th continental hierarchical level described by rather low basis of erosion and the much greater spatial contrast of hydrothermal conditions.

Key words: prediction ecological mapping, geomorphometrics, morphometric's size, landscape communications, not parametrical statistics.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Термин «предсказательное картирование почв» был введен в литературе сравнительно недавно и определен в обзоре (Scull et al., 2003) следующим образом: «Предсказательное картирование почв может быть определено как разработка цифровой или статистической модели взаимосвязи между переменными окружающей среды и свойствами почв, которая затем применяется к географической базе данных для создания предсказательной карты». Переменными окружающей среды могут быть внешние по

---

\* Институт экологии Волжского бассейна РАН

отношению к почве характеристики рельефа, такие как данные аэро- или космоснимков, растровые измерения электропроводности почв и другие (McBratney et al., 2000). Термин получил широкое признание в мире и был вскоре распространен на исследования пространственной изменчивости в геоботанике как «предсказательное картирование растительности» (напр., Lees et al., 2006) и на исследования пространственной изменчивости в экологии как «предсказательное экологическое картирование» (напр., MacMillan et al., 2007).

Количественные исследования в этом направлении велись и раньше (напр., McKenzie, Ryan, 1999), но не было общепринятого термина, при этом в обзоре (McBratney et al., 2000) было отмечено, что рельеф является наиболее важным предиктором среди переменных окружающей среды. Заметим, что рельеф при этом является одним из факторов почвообразования, а все остальные факторы по отношению к рельефу могут быть рассмотрены как факторы рельефообразования, о чем впервые писал еще С.С. Неуструев (1930). Результаты этих исследований часто представляются матрицей значений предсказанной характеристики экосистемы (в каждом элементе доступны числовые значения), из которой формируется по определенной легенде карта. Это двойное понятие далее называется картой-матрицей.

Понимание отечественными исследователями значения обоснованного крупномасштабного картирования различных ландшафтных параметров отражает, например, высказывание Д.Л. Арманды (1967, С.21-22) в отношении индекса сухости: «При всем принципиальном значении периодического закона географической зональности его явно недостаточно для определения ... естественных растительных сообществ ... Поэтому насущной задачей ... является видоизменение для малых территорий формулы индекса сухости и разработка методов его определения».

Новые возможности для предсказательного картирования предоставляет развивающаяся вместе с ГИС-технологиями геоморфометрия как наука о количественном анализе рельефа (Pike, 1995). Библиография по геоморфометрии и ее приложениям (в экологии, почвоведении, геоботанике и др.), насчитывает около 6,5 тысяч литературных источников (Pike, 2002). В частности, предсказательное экологическое картирование совместно с геоморфометрией открывают пути разработки обоснованных количественных подходов для выделения региональных типов местоположения, для пространственной дифференциации лито- и гидроморфизма, определенных Э.Г. Коломыцом (2005) в качестве базовых составляющих ландшафтно-экологического анализа и прогноза во времени.

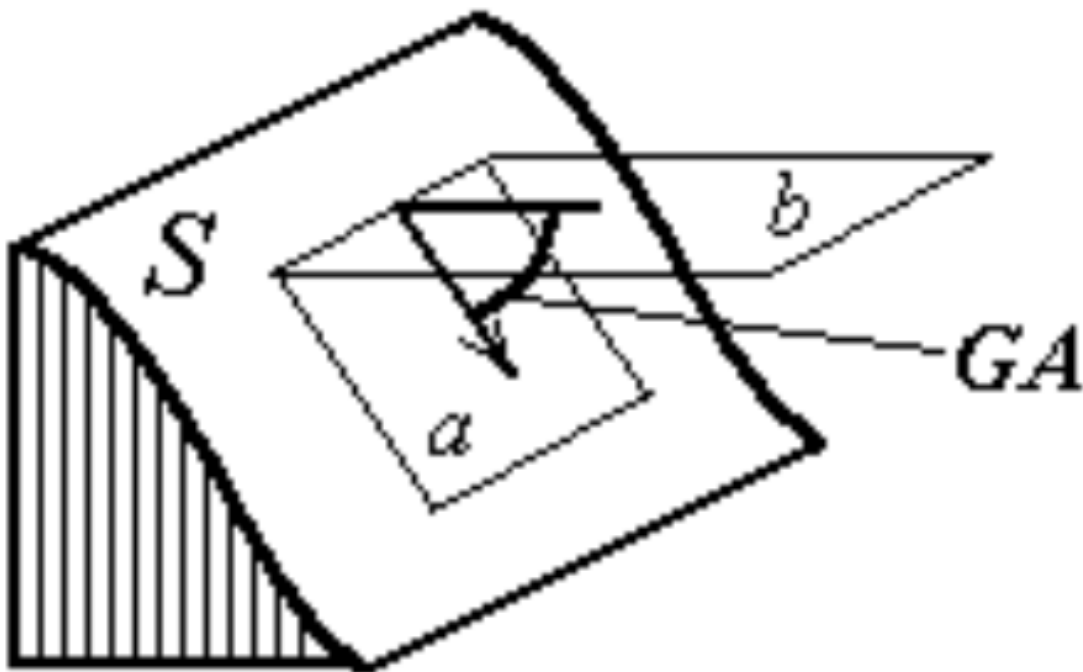
Цель настоящей работы заключается 1) проведение сравнительного географического анализа методами геоморфометрии для выявления специфики экологических условий Самарской Луки, 2) отработка методик определения наиболее важных предикторов характеристик экосистемы, 3) представление части результатов по изучению пространственной изменчи-

ности экосистемы Жигули с помощью карт-матриц предсказательного экологического картирования.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ГЕОМОРФОМЕТРИИ

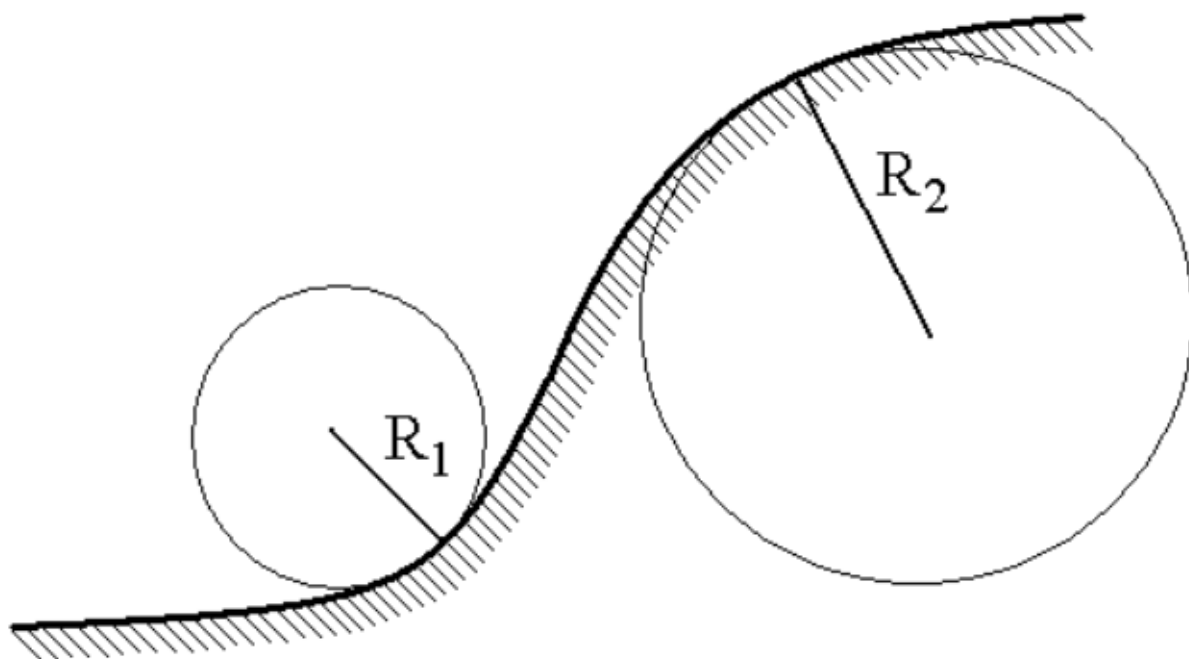
В этом разделе описываются некоторые понятия геоморфометрии, полезные для понимания представленных в настоящей работе результатов.

Крутизна склонов описывается углом уклона  $GA$  (в градусах), представляющим собой угол между горизонтальной и касательной к земной поверхности  $S$  плоскостями (рис. 1). Фактор крутизны  $GF = 100 \cdot \sin(GA)$ , выражаемый в процентах (Strahler, 1952), лучше характеризует тянущую со склонов силу, поскольку пропорционален касательной к земной поверхности составляющей силы тяжести.



**Рис.1. Крутизна склона рассчитывается как угол уклона  $GA$  между горизонтальной и касательной поверхностями.**

Форму склонов характеризует также то, насколько они искривлены в плане и в профиле. Соответствующие характеристики рельефа есть *кривизны* земной поверхности. Например, вертикальная кривизна  $k_v$  характеризует форму профиля склона и равна  $\pm 1/R$ , где  $R$  есть радиус кривизны, а знак выбирается положительным для выпуклых участков профиля и отрицательным – для вогнутых (рис.2). Определение горизонтальной кривизны  $k_h$  подобно для отраженного горизонталями плана.



**Рис.2. Схема профиля склона для пояснения вертикальной кривизны  $k_v$ . Радиусы кривизны  $R$  имеют разные знаки для выпуклого ( $R_2 > 0$ ) и вогнутого ( $R_1 < 0$ ) участков профиля склона, а  $k_v = 1/R$ .**

В работе (Sharq, 1995) доказана связь между двумя механизмами аккумуляции мигрирующих по земной поверхности под действием силы тяжести веществ и горизонтальной ( $kh$ ) и вертикальной ( $k_v$ ) кривизнами. В первом случае аккумуляция происходит за счет сближения (конвергенции) потоков веществ, во втором – за счет замедления их на вогнутых участках склонов. Основанная на знаках кривизн классификация форм рельефа Ф.Р. Трёха (Troeh, 1964) делит всю земную поверхность на 4 типа форм: вогнутые в плане и профиле (зоны относительной аккумуляции), выпуклые в плане и профиле (зоны относительного сноса), выпуклые в плане и вогнутые в профиле (транзит 1), вогнутые в плане и выпуклые в профиле (транзит 2), см. рис. 3. Каждой из этих форм соответствуют неповторимое сочетание процессов сноса, транзита и аккумуляции веществ. Например, транзит 1 характеризуется сносом веществ за счет ускорения их на выпуклых в профиле склонах и аккумуляцией (частичным переотложением) их путем сближения потоков. Объединение этой классификации с классификацией геометрических форм Гаусса позволяет получить 12 элементарных (несоставных) форм рельефа (Шарая, Шарый, 2004).

Н.М. Сибирцев (1900) отметил, что терморезим склонов характеризуется степенью перпендикулярности падения солнечных лучей на земную поверхность, которая в свою очередь зависит как от ориентации (экспозиции), так и от крутизны склонов. Соответствующей морфометрической величиной ( $MВ$ ), учитывающей одновременно ориентацию и крутизну является освещенность  $F(a,b)$ , равная 100% для перпендикулярного падения солнечных лучей и 0% для касательного падения и теневых склонов (Sharq

et al., 2002).  $F(a,b)$  зависит от двух углов, определяющих положение Солнца (рис.4). По этой причине для изучения терморежима использована освещенность, поскольку ориентация, являясь циклической величиной непригодна для статистических сравнений.

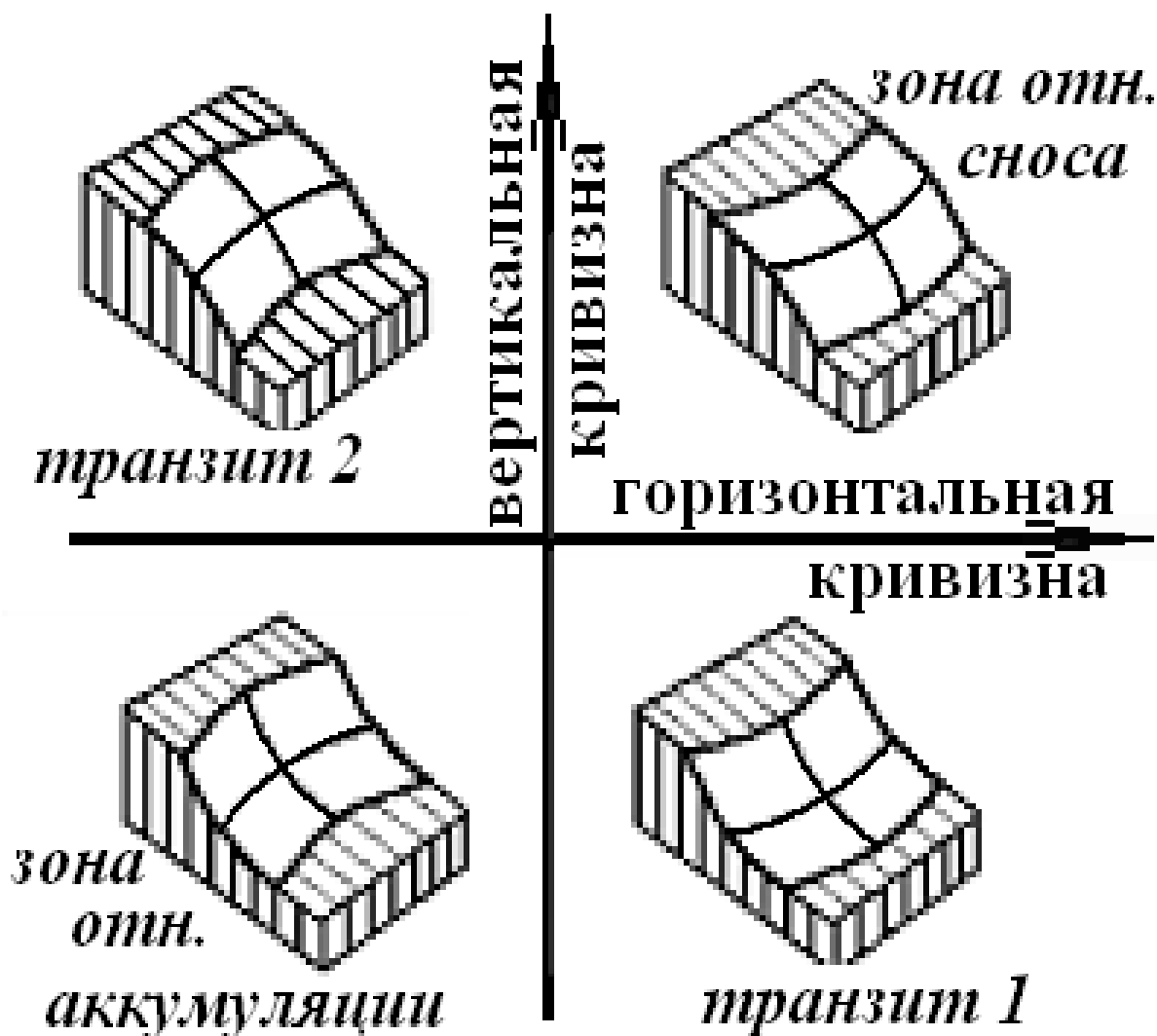
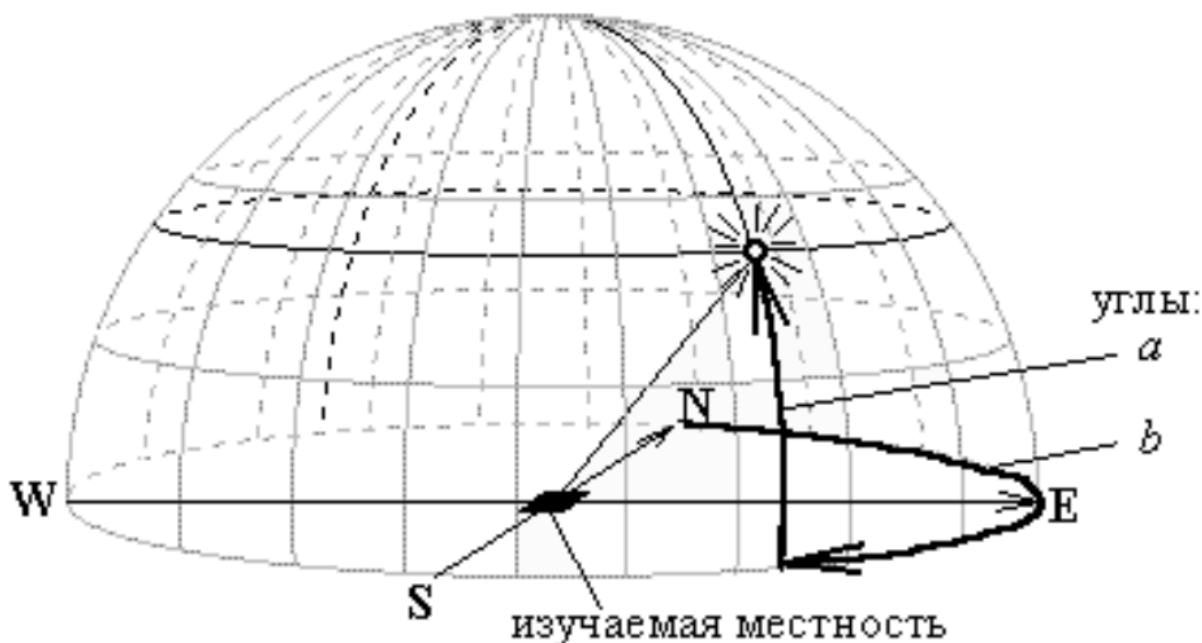


Рис.3. Классификация форм рельефа по знакам горизонтальной и вертикальной кривизн (Troeh, 1964).

Площадь сбора ( $MCA$ ) регионально (нелокально) описывает положение в рельефе (например, в бассейне) и 1-ый механизм аккумуляции, то есть сближение и расхождение потоков в плане. Согласно классическим положениям Б.Б. Польшова (1934), водосборная площадь является для бессточных депрессий также и солесборной, а также описывает миграцию мелкодисперсной фракции почв; по этим причинам термин «водосборная площадь» принято заменять на термин площадь сбора. Алгоритм расчета площади сбора, включающий в себя и расчет бессточных депрессий, описан в работах (Martz, de Jong, 1988; Freeman, 1991); алгоритмы расчета локальных  $MB$  описаны в работе (Shary et al., 2002) и сравнены в работе (Schmidt et al., 2003).



**Рис.4.** Два угла,  $a$  и  $b$ , определяющих положение Солнца на небосводе.  $a$  есть склонение Солнца от горизонта,  $b$  есть азимут Солнца.

Используемые в настоящей работе В-холмы (буква В обозначает класс МВ) являются собирательным геометрическим понятием для гор, холмов, возвышенностей, увалов и т.п. Методической основой для проведения их расчетов является положение П.К. Соболевского (1932) о том, что при инверсии высот (т.е. замене высот  $Z$  на  $-Z$ ) бессточные депрессии заменяются холмами, горами и т.п. (Shary et al., 2005). В-холмы имеют иерархическое устройство, в котором наиболее низкий (нулевой) уровень иерархии есть весь континент, однако одним из наиболее важных является первый континентальный уровень иерархии. Границей В-холма 1-го континентального уровня является наибольшая замкнутая горизонталь, находящаяся внутри данного континента (или острова). Границей В-холма 2-го континентального уровня является наибольшая замкнутая горизонталь, находящаяся внутри данного В-холма 1-го континентального уровня, и так далее.

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Результаты настоящего исследования основаны на использовании части целого спектра характеристик экосистемы, измеренных в 40 картографически привязанных точках (пробных площадях) экспериментального полигона Жигули. Описание материалов и их анализ содержатся в главе «Лесные экосистемы Самарской Луки в условиях предстоящего глобального потепления» данной книги.

В анализе статистических связей использовалась сравнительно простая модель линейной множественной регрессии, применяемая к расширенной системе 18-ти морфометрических величин (обычно в анализе использовалось до шести МВ). Методика ее применения к расширенной системе МВ (Шарый, Шарая, 2006) состоит в том, что в программе осуществ-

## Расширенная система базовых морфометрических величин

№	Название МВ (обозначение)	Что описывает
МВ, описывающие поверхностный сток		
0	Ориентация* склонов ( $A_0$ )	Направление потоков
1	Кругизна склонов ( $GA$ )	Скорость потоков
2	Горизонтальная кривизна ( $kh$ )	1-ый механизм аккумуляции
3	Площадь сбора ( $MCA$ )	
4	Дисперсивная площадь ( $MDA$ )	
5	Вертикальная кривизна ( $kv$ )	2-ой механизм аккумуляции
6	Разностная кривизна ( $E$ )	Сравнивает 1-ый и 2-ой механизмы аккумуляции
7	Полная аккумуляционная кривизна ( $KA$ )	Выявляет зоны относительной аккумуляции
МВ, описывающие расчлененность рельефа		
8	Полная кольцевая кривизна ( $KR$ )	Извилистость потоков (расчлененность рельефа)
9	Горизонтальная избыточная кривизна ( $khe$ )	Эти две МВ расщепляют извилистость потоков (расчлененность рельефа) на две компоненты
10	Вертикальная избыточная кривизна ( $kve$ )	
11	Ротор ( $rot$ )	Направление поворота линий тока (расчлененность рельефа)
МВ, описывающие память в ландшафтах		
12	Несферичность ( $M$ )	Отличие формы рельефа в точке от сферической
13	Средняя кривизна ( $H$ )	«Равновесную» (минимальную) поверхность, имеющую минимальную при данной границе площадь
14	Максимальная кривизна ( $k_{max}$ )	Гребневые формы рельефа
15	Минимальная кривизна ( $k_{min}$ )	Килевые формы рельефа
16	Полная гауссова кривизна ( $K$ )	Не меняется при изгибании поверхности
МВ, описывающие терморезим склонов		
17	Освещенность склонов ( $F$ )	Интенсивность прямого солнечного излучения
МВ, описывающие высотную зональность		
18	Высота земной поверхности ( $z$ )	Изменение температуры и давления атмосферы

\* Ориентация не использовалась в настоящем исследовании для статистических сравнений.

ляется решение уравнения линейной множественной регрессии для трех линейно независимых величин  $MB_1$ ,  $MB_2$ ,  $MB_3$ ,

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

где  $X$  есть изучаемая характеристика экосистемы, а  $a, b, c, d$  есть коэффициенты регрессии, которые рассчитываются по измеренным или рассчитанным  $X$  и по рельефу. Все линейно независимые тройки из 18-ти МВ (их 800) рассчитываются в программе, и из них отбираются те, которым отвечает наиболее высокий ранговый коэффициент корреляции Спирмана  $r_s$ . При этом возможно исключение некоторых МВ из рассмотрения, например, не имеющих физического смысла для данной местности.

Значения каждой МВ в уравнении (1) *нормируются* на диапазон от 0 до 1 для того, чтобы относительные значения коэффициентов регрессии  $a, b, c$  можно было использовать для оценки относительной роли МВ как предикторов в найденной взаимосвязи (Tomer, Anderson, 1995).

В качестве данных о высотах земной поверхности для исследования характеристик экосистемы Жигули использовались открытые данные НАСА проекта SRTM в виде матриц с размером ячейки (шагом решетки) 50 метров, пересчитанные в проекцию Гаусса-Крюгера для 9-ой шестиградусной зоны. В качестве данных о высотах земной поверхности для изучения Самарской Луки как особенности континентального уровня использовались данные НАСА GTOPO30 с разрешением в плане 900 метров для всей Евразии (Shary et al., 2005).

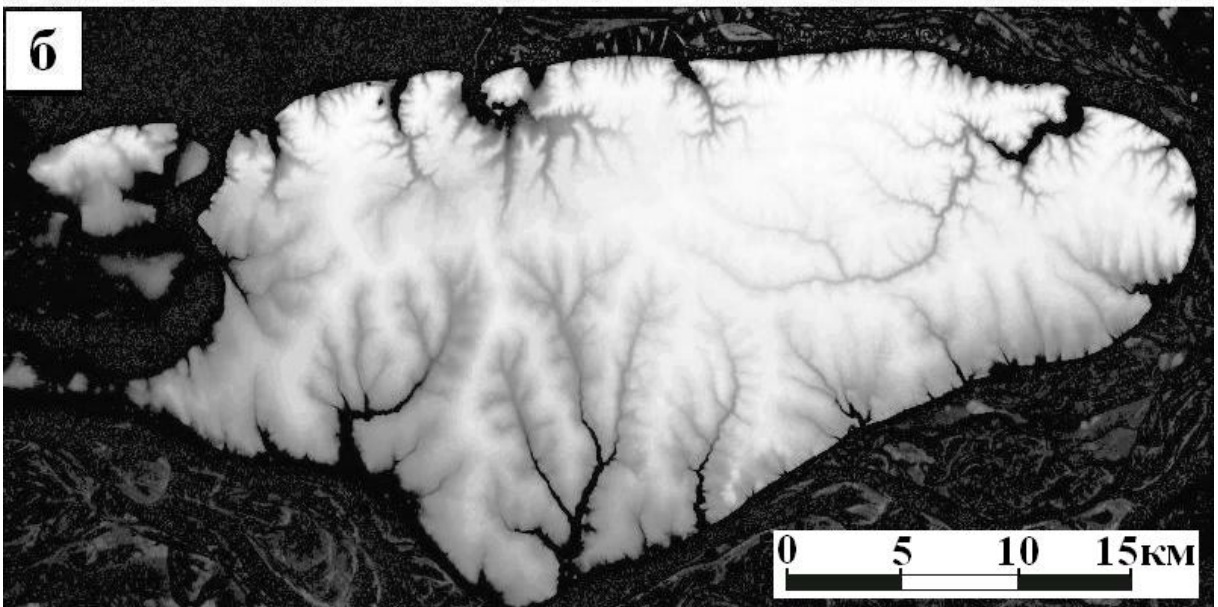
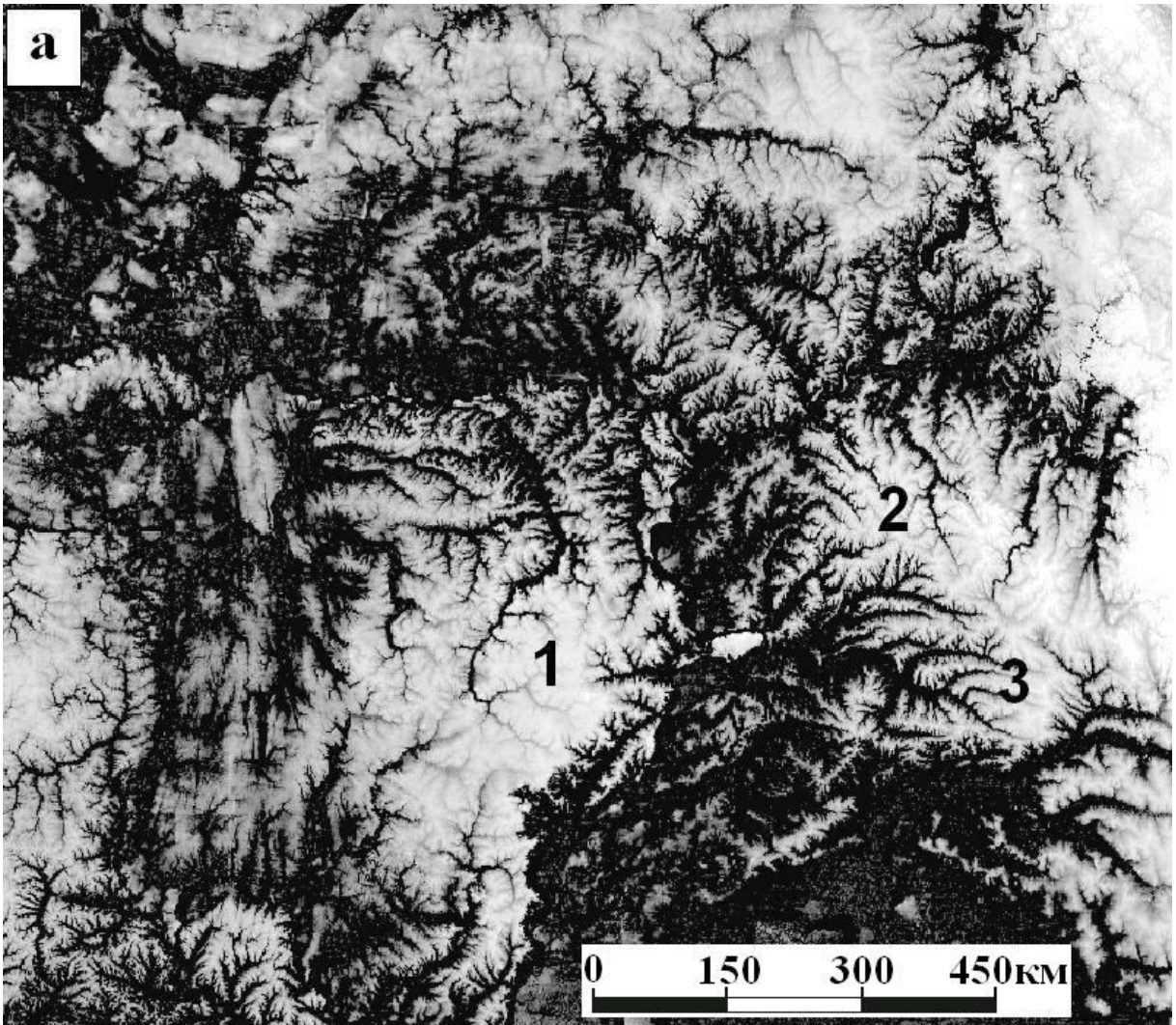
Локальные МВ, зависящие от первых производных (крутизна и освещенность склонов), рассчитывались по методу Эванса-Янг (Pennock et al., 1987), а кривизны – по модифицированному методу Эванса-Янг (Shary et al., 2002). Расширенная система МВ представлена в табл. 1 вместе с кратким описанием смысла каждой и их обозначениями. См. подробнее работу (Shary et al., 2002). Отметим, что ориентация склонов не использовалась в настоящей работе потому, что она является циклической величиной (0 и 360° отвечают одному и тому направлению склонов – на север) и коэффициент корреляции между ней и характеристикой экосистемы не имеет смысла; кроме того, освещенность склонов более адекватна для описания терморезима склонов, как показано в предыдущем разделе.

Для проведения расчетов и построения карт использовалась ГИС-программа «Аналитическая ГИС Эко» (Shary, 2001).

#### **4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ КОНТРАСТНОСТЬ УСЛОВИЙ САМАРСКОЙ ЛУКИ**

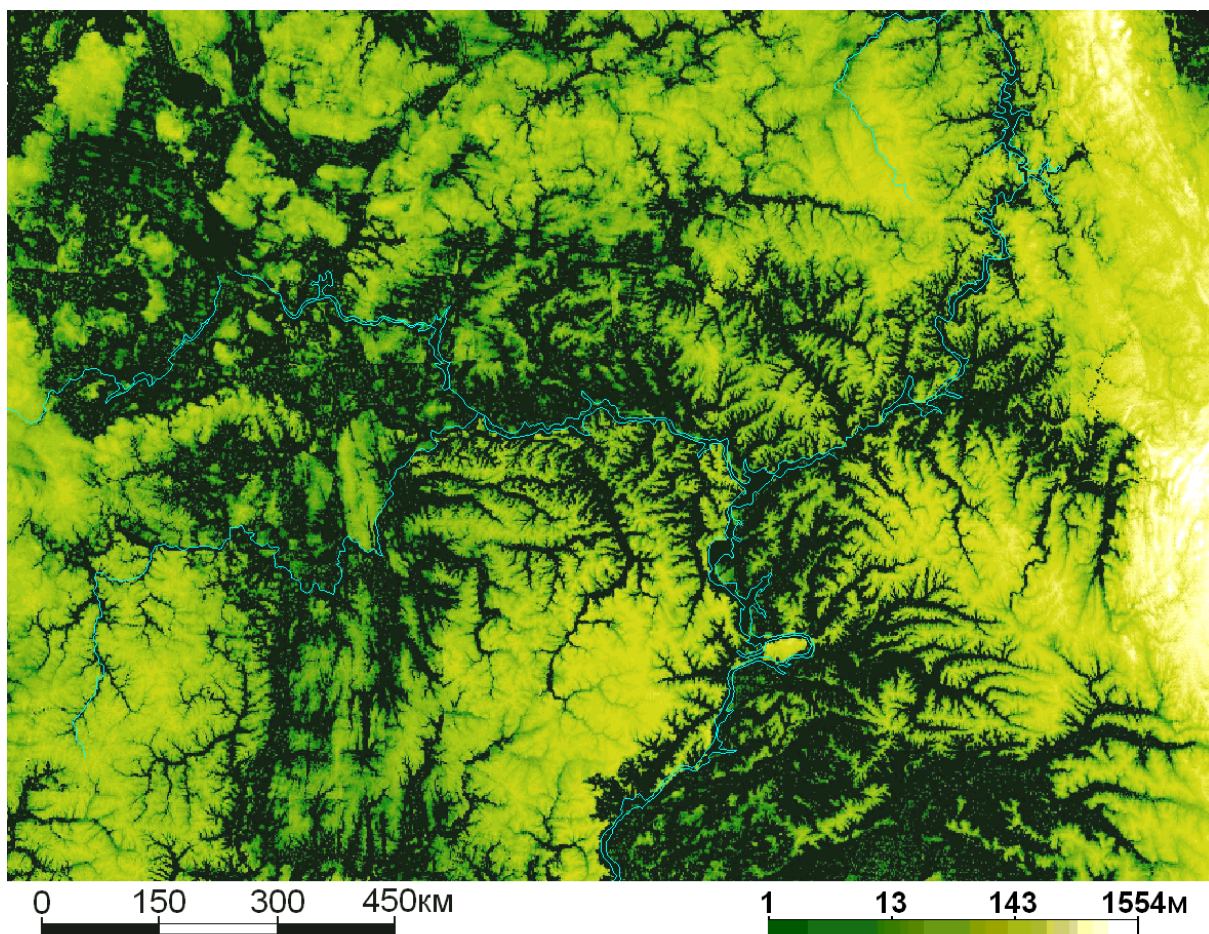
Использование методов геоморфометрии позволяет получить новые знания о природе необычного явления в центре Русской равнины – горного ландшафта Жигулей, – существенно отличающегося рельефом и растительностью от окрестных ландшафтов Среднего Поволжья. Самарская Лука определена ниже как самостоятельная геометрическая структура первого континентального уровня в семействе гор, холмов и возвышенностей по результатам морфометрического анализа рельефа Евразии. На карте возвышенностей Среднего Поволжья, рассчитанной по данным НАСА GTOPO30 (разрешение в плане 900 м) о высотах земной поверхности для всей Евразии методами геоморфометрии, Самарская Лука имеет форму





(подпись к рисунку см. ниже)





**Рис. 5. Общий вид В-холмов Среднего Поволжья (рис.5а):**

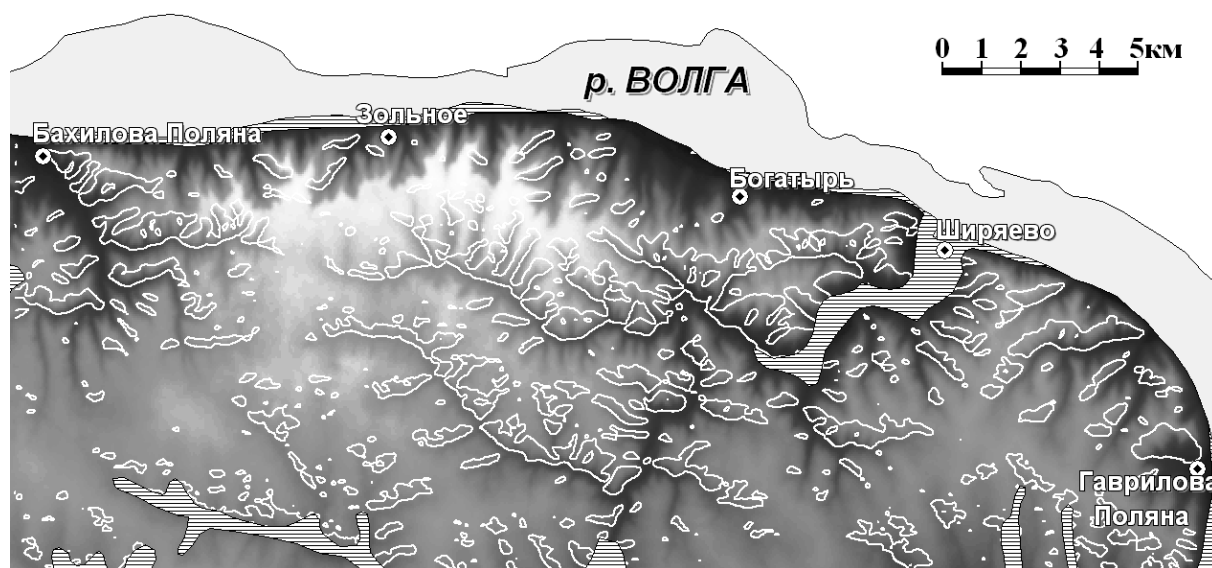
1 – Приволжская возвышенность, 2 – Бугульминско-Белебеевская возвышенность, 3 – Северный Общий сырт, между ними сравнительно небольшой «остров» - Самарская Лука. Граница и высоты В-холма Самарская Лука (рис. 5б).

сравнительно небольшого «острова», представляющего собой отдельное образование (В-холм) среди широко простертых с глубоко изрезанными очертаниями соседних возвышенностей (рис.5а).

Более подробные данные НАСА о рельефе (SRTM, разрешение в плане 90 м) позволили существенно точнее рассчитать характеристики формы В-холма Самарской Луки: граница ее находится на высоте 71 м, объем составляет  $146 \text{ км}^3$ , площадь  $1300 \text{ км}^2$ , средняя высота 112 м, максимальная высота 306 м (рис.5б). Эта информация позволяет провести количественные сравнения с другими возвышенностями Поволжья: например, границы В-холмов, которые определяются наибольшей замкнутой горизонталью внутри континента, у Приволжской возвышенности находится на 83 м выше (154 м), у Северного Общего сырта – на 64 м выше (135 м), у Бугульминско-Белебеевской возвышенности – на 67 м выше (138 м). Эти данные свидетельствуют о более сильной «погруженности» подножия В-холма Самарской Луки на Русской равнине. В Среднем Поволжье не обнаружено других В-холмов со столь низкой границей. Из этого следует, что

при одинаковых максимальных абсолютных высотах Приволжской возвышенности и Жигулей (около 360 м), максимальная высота холма Самарской Луки относительно подножия находится выше – значит, Жигули возвышаются дополнительно еще на 83 м относительно своего базиса эрозии. Если использовать отношение наибольшего перепада высот холма к диаметру описывающей его окружности, то для Жигулей находим  $5 \cdot 10^{-3}$ , для Приволжской возвышенности –  $3 \cdot 10^{-4}$ . Эта безразмерная величина отражает перепад высот на единицу длины и дает морфометрическую характеристику для сравнительного географического анализа ландшафтов.

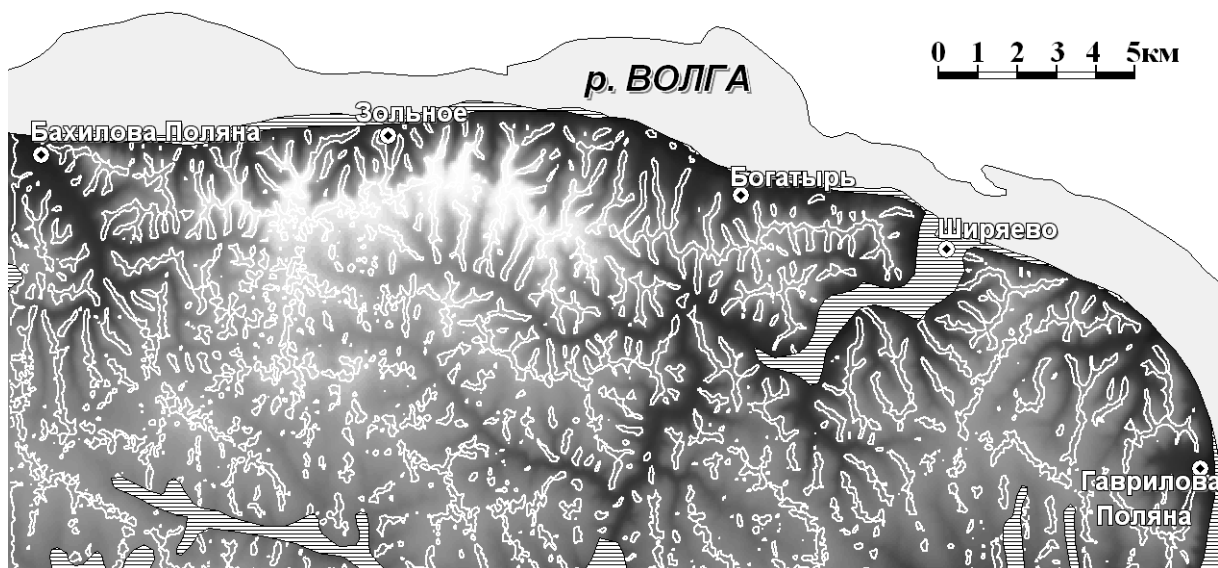
Особенности рельефа Жигулевского низкогорья, определяющего специфику гидротермических условий экосистемы Жигули, можно охарактеризовать следующим образом. Терморезим склонов Самарской Луки может быть оценен процентом площади, на которой падение солнечных лучей близко к перпендикулярному. Анализ матрицы освещенности (при азимуте  $180^\circ$  и склонении Солнца над горизонтом  $45^\circ$ ) показал, что площадь поверхности с углом падения лучей от  $90^\circ$  до  $49^\circ$  равна для Самарской Луки 15%, склонами такого режима на прилегающей территории Самарской области занято лишь 2,2% местности (рис.6). Такие данные служат основанием для определения терморезима экосистемы Самарской Луки как *сравнительно контрастного и уязвимого к повышению температуры*.



**Рис. 6. Области сильной освещенности (показаны белыми контурами).**

Гидрологический режим местности хорошо отражает площадь сбора. Максимальное значение площади сбора в Самарской Луке равно  $131 \text{ км}^2$ , а в Самарской области (при исключении из рассмотрения р. Волги) даже небольшие сухие русла могут иметь площадь сбора более  $200 \text{ км}^2$ , а реки Сок и Самара – более  $10\,000 \text{ км}^2$ . Средние значения площади сбора для этих сравниваемых территорий различаются вдвое (для Самарской Луки  $0,018 \text{ км}^2$ ). В Самарской Луке 12,5% территории занимают области с низ-

ким значением площади сбора (менее 0,25 га), они представлены приводо-раздельными областями, критическими при снижении атмосферных осадков (рис.7).



**Рис. 7. Приводораздельные области Самарской Луки, площадь сбора менее 0,25 га (показаны белыми контурами).**

Среднее значение фактора крутизны, примерно в равной степени отражающее изменения термического и гидрологического режима, связано также с тянущей силой потоков сыпучих и жидких веществ со склонов. Для изученной части Самарской Луки это значение составляет 12,7%, а для Самарской области – лишь 2,6%; часть территории, имеющая сравнительно высокие значения фактора крутизны (более 22,8%), занимает в изучаемой экосистеме 18,8%, в области – 0,15%.

Морфометрические статистические характеристики рельефа Самарской Луки существенно отличаются от прилегающей Самарской области и исследованного нами рельефа Присурья сравнительно резко выраженными градиентами, которые способствуют формированию более контрастного в пространстве и «жесткого» гидротерморезима в Жигулях даже при равных климатических условиях.

## **5. АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ И ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Для всех изучавшихся параметров экосистемы, составляющих гидро-геоморфологический и почвенный блоки, определена тесная статистическая связь с рельефом в моделях множественной регрессии при уровне значимости  $P < 10^{-6}$  или  $P < 10^{-5}$ .

Одним из важных экологических факторов является, как известно, тип местоположения (МП) – геотоп. Упорядоченный ряд геотопов в направлении от элювиального типа МП до аккумулятивного образует локальную

Таблица 2

## Уравнения множественной регрессии для различных характеристик

Характеристика экосистемы (X)	Уравнение линейной множественной регрессии	Коэффициенты				$r_s^{**}$	P
		a	b	c	d		
Тип местоположения	$X = a \cdot MCA^* - b \cdot Z + c \cdot GA + d$	2,43	1,18	0,81	1,78	0,76	$<10^{-6}$
Гранулометрический состав почв	$X = a \cdot MCA + b \cdot KA - c \cdot GA + d$	3,95	1,58	1,39	1,49	0,69	$<10^{-5}$
Тип местообитания	$X = -a \cdot F(30,180) - b \cdot GA + c \cdot MCA + d$	2,17	2,04	1,51	4,8	0,74	$<10^{-6}$
Мощность гумусового профиля	$X = -a \cdot F(30,180) - b \cdot GA - c \cdot kv + d$	44,47	27,84	15,66	78,13	0,69	$<10^{-5}$
Температура почвы на глубине	30 см $X = a \cdot GA - b \cdot KR + c \cdot F(30,145) + d$	3,01	1,92	0,71	12,03	0,73	$<10^{-6}$
	50 см $X = a \cdot GA - b \cdot KA + c \cdot F(30,135) + d$	2,63	2,45	0,79	11,55	0,76	$<10^{-6}$
Влажность почвы на глубине	30 см $X = -a \cdot GA - b \cdot F(30,225) - c \cdot kv + d$	24,15	11,96	10,88	43,67	0,72	$<10^{-6}$
	50 см $X = a \cdot MCA - b \cdot GA - c \cdot F(30,225) + d$	20,92	11,67	6,86	11,55	0,70	$<10^{-6}$
Проективное покрытие напочвенного покрова	$X = -a \cdot GA + b \cdot F(30,220) - c \cdot kh + d$	27,11	7,22	4,75	25,65	0,73	$<10^{-6}$
Высота травостоя	$X = a \cdot F(30,180) - b \cdot KA + c \cdot kh + d$	24,99	21,82	12,03	6,63	0,68	$<10^{-5}$
Экологические группы травостоя	$X = -a \cdot GA - b \cdot F(30,220) + c \cdot MCA + d$	2,35	1,94	1,09	4,74	0,74	$<10^{-6}$
Количество подроста хвойных	$X = -a \cdot KR + b \cdot MCA + c \cdot F(30,210) + d$	5112	1988	1059	2892	0,61	$<10^{-3}$
Количество подроста лиственных	$X = a \cdot KA + b \cdot F(30,240) + c \cdot MCA - d$	1609	702	324	832	0,61	$<10^{-3}$
Количество подлеска	$X = a \cdot GA + b \cdot F(30,190) - c \cdot Z + d$	2955 3	22198	14553	1125	0,77	$<10^{-6}$
Запасы древесины	$X = -a \cdot MCA - b \cdot GA - c \cdot H + d$	91,15	75,82	61,81	237,0	0,63	$<10^{-4}$
Общая фитомасса подроста и подлеска	$X = a \cdot kve + b \cdot rot - c \cdot F(30,200) + d$	30,22	21,96	10,97	3,99	0,54	$<10^{-3}$
Общая зеленая фитомасса	$X = a \cdot F(30,200) + b \cdot kv - c \cdot K + d$	4,15	2,09	1,51	3,84	0,57	$<10^{-3}$
Масса лесной подстилки	$X = a \cdot F(35,155) + b \cdot GA - c \cdot kv + d$	21,70	18,01	14,99	10,32	0,76	$<10^{-6}$
Годичный прирост скелетной древесины	$X = a \cdot Z - b \cdot K + c \cdot kh + d$	5,09	5,06	2,78	1,33	0,77	$<10^{-6}$
Отношение продуктивности к фитомассе	$X = -a \cdot kh - b \cdot Z + c \cdot F(35,155) + d$	0,036	0,029	0,028	0,089	0,61	$<10^{-4}$
Индекс упругой устойчивости	$X = -a \cdot kmax + b \cdot KA - c \cdot Z + d$	0,587	0,555	0,291	0,648	0,64	$<10^{-4}$

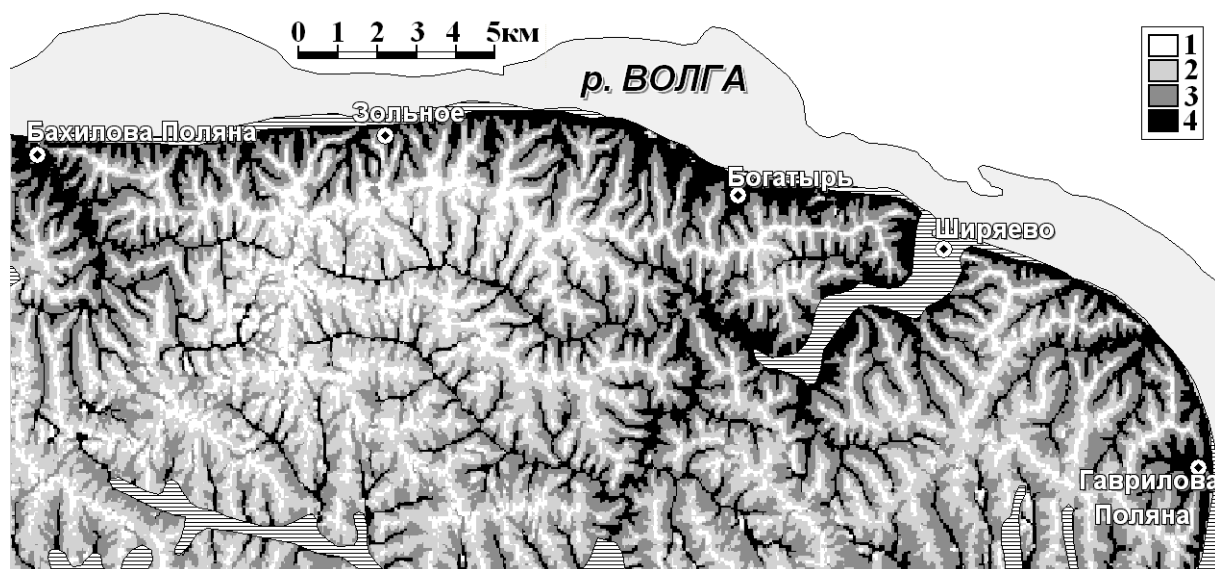
\* - обозначения морфометрических величин указаны в таблице 1.

\*\* - ранговый коэффициент корреляции Спирмана



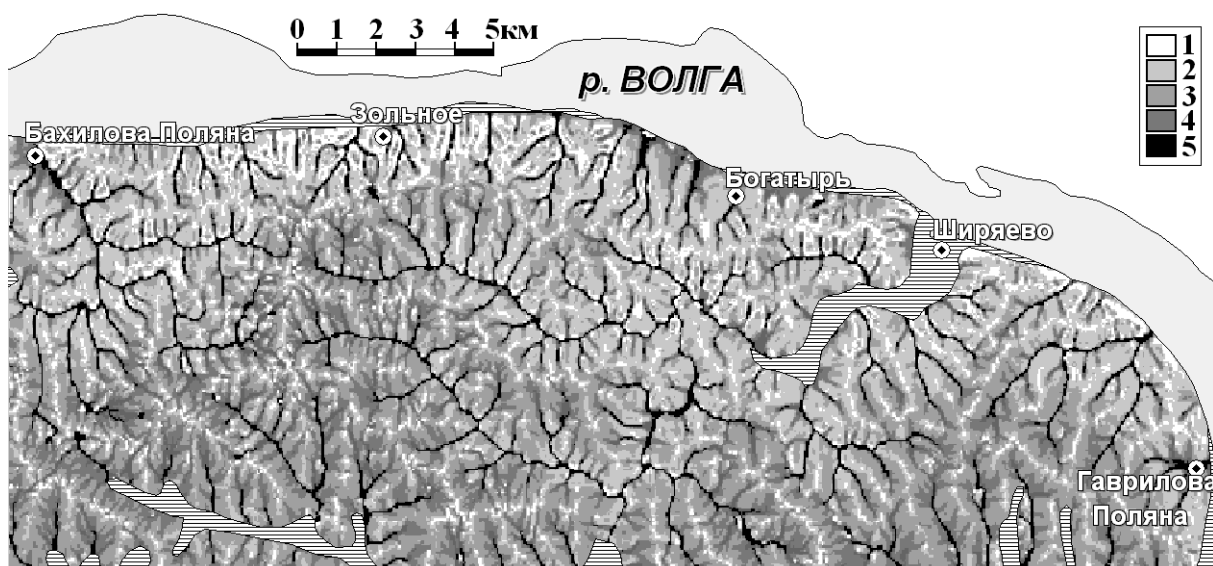
систему ландшафтных сопряжений, по М.А. Глазовской (1964), или катену. В результате анализа связи геотопов с матрицами МВ обнаружено, что вариации типов местоположения определяют главным образом совместные изменения площади сбора, высоты и крутизны склонов (см. табл. 2). Их сочетание отражает физический смысл выделения самих геотопов. Одна лишь высота может не описывать, например, элювиальный тип местоположения, т.к. приводораздельные области одних бассейнов могут находиться ниже притальвеговых областей других. Нормирование МВ в уравнении множественной регрессии позволяет не только выявлять ведущие МВ-предикторы, но и определять относительный вклад (вес) каждого из них в определение значений параметра экосистемы путем сравнения коэффициентов у предикторов в этом уравнении. В случае изменения типов местоположения в пространстве наибольший вес имеет площадь сбора, примерно вдвое меньший – высота и втрое меньший – крутизна.

Изображение карты-матрицы типов местоположения показано на рис. 8. Относительные площади, занимаемые каждым из типов рассчитаны из матрицы: 11% площади занято элювиальным типом, 35% - трансэлювиальным, 34% - транзитным и 20% - трансакумулятивным и аккумулятивным.



**Рис. 8. Изображение карты-матрицы типов местоположения экосистемы Жигули: 1-элювиальный, 2-трансэлювиальный, 3-транзитный, 4-транаккумулятивный и аккумулятивный типы.**

Таким образом, вероятность обнаружения, например, элювиального типа местоположения увеличивается, в первую очередь, с уменьшением площади сбора, во вторую – с увеличением высоты и в третью – с уменьшением крутизны, последнее часто отвечает слабонаклонным или почти плоским приводораздельным участкам местности. Обнаружение тесной связи открывает возможности формализации критериев для расчета пространственного распределения типов местоположения непосредственно по рельефу.



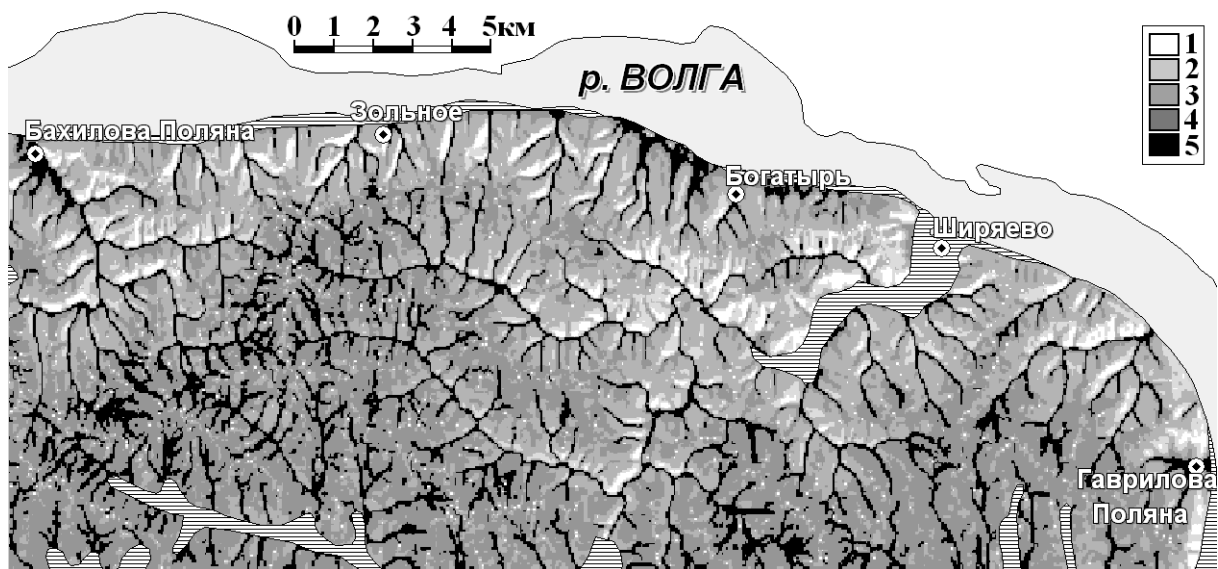
**Рис. 9. Изображение карты-матрицы гранулометрического состава почвообразующих пород:**

1-рыхлый песок, 2-связный (оглиненный) песок и супесь, 3-легкий суглинок, 4- средний суглинок, 5-тяжелый суглинок, элювий коренных пород.

Другим параметром, в определении которого, как и описанного выше, ведущую роль играет площадь сбора, является гранулометрический состав (мехсостав) почвообразующих пород (рис. 9), который также определялся в полевых условиях градацией от 1 до 5, согласно ряду рыхлый песок – тяжелый суглинок, для чего использовалась оценочная методика Н.А. Качинского (1965). Такая роль площади сбора может быть связана с тем, что формирование современного рельефа Самарской Луки происходило путем активного эрозионно-денудационного сноса (Обедиентова, 1953). Вторым предиктором является аккумуляционная кривизна, характеризующая степень искривления зон относительного сноса и аккумуляции; ее вес и знак отражает (подчеркивает) тенденцию накопления мелкодисперсных частиц в локальных зонах аккумуляции, а более крупных – в зонах относительного сноса. Третий предиктор – крутизна (отрицательная связь) показывает, что изменение гранулометрического состава, например от крупных частиц к более мелким, может «тормозиться» при прочих равных условиях уменьшением крутизны склонов. Отметим, что в таблице 2 приведены уравнения с наибольшим коэффициентом корреляции Спирмана, однако для матрицы гранулометрического состава получены другие уравнения с несколько более низким коэффициентом корреляции, где вместо аккумуляционной кривизны присутствует освещенность (отрицательная связь). Эта связь отражает отмечаемую исследователями особенность преобладания суглинистых делювиальных отложений на северных склонах.

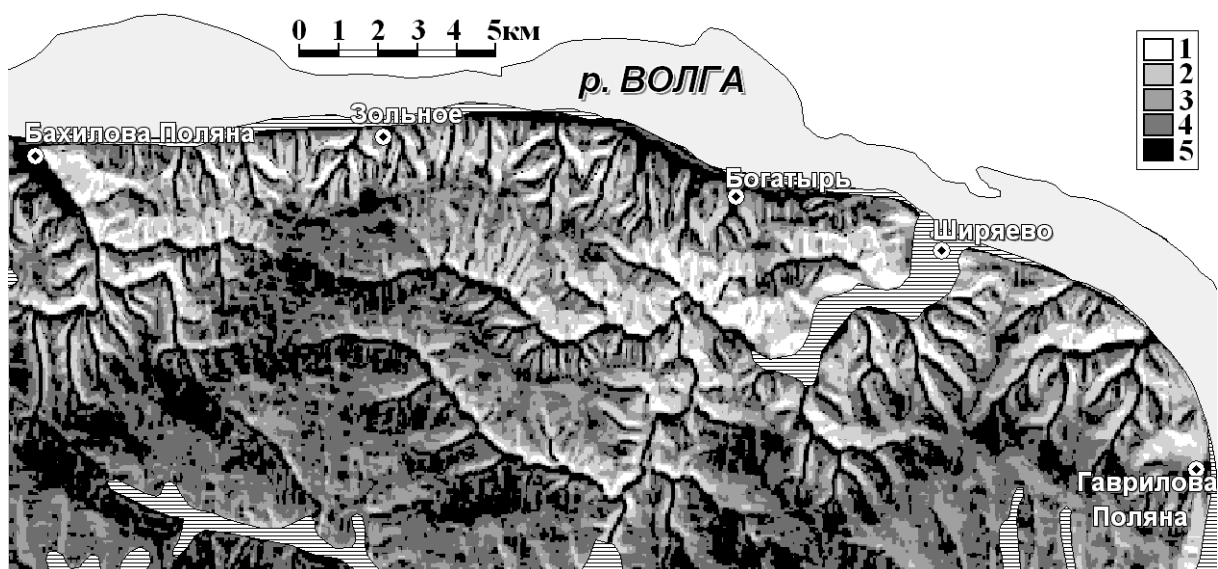
Пространственное распределение типов местообитания экосистемы Жигули в градации от 1 до 5, соответствующей ряду субори сухие (С1) – дубравы сырые (D4), определяется освещенностью, крутизной и площадью

сбора (рис. 10). Большая вероятность встретить, например, дубравы сырые (D4) теснее связана в рельефе с низкими значениями освещенности и пологими склонами (они имеют почти равные веса), менее тесно – с относительно высокой площадью сбора. В этом случае «сухость» и «сырость» выявленных местообитаний в большей степени зависит от освещенности, чем от лидирующей обычно при анализе увлажненности площади сбора.



**Рис. 10. Изображение карты-матрицы типов местообитания экосистемы Жигули:**

1- C<sub>1</sub>, субори сухие, 2- C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, субори свежие и влажные, 3- D<sub>2</sub>, дубравы свежие, 4- D<sub>3</sub>, дубравы влажные, 5- D<sub>4</sub>, дубравы сырые.



**Рис. 11. Изображение карты-матрицы мощности гумусового профиля.**  
Мощность в см: 1 – 5-16; 2 – 16-32; 3 – 32-40; 4 – 40-45; 5 – 45-97.

Наиболее тесно (положительно) связана с мощностью гумусового профиля в уравнении регрессии освещенность, характеризующая терморегу-



жим склонов, хотя здесь также важны крутизна склонов и вертикальная кривизна (рис.11). Аналогичная роль терморежима склонов (по неколичественной оценке с использованием ориентации склонов) отмечалась, например, в работе (Проценко, 2004), в которой, однако, сравнительная роль других МВ не оценивалась. Заметим, что уравнение регрессии отражает связь мощности с двумя конкурирующими процессами: сноса (связан с ростом крутизны) и накопления (увеличение значений вертикальной кривизны). Коэффициенты при этих МВ показывают, что увеличение мощности гумусового профиля в большей степени определяется уменьшением сноса (изменением крутизны), чем аккумуляцией веществ за счет увеличенной вогнутости профиля склона. Возможно, что такой характер конкуренции отражает специфику процессов в условиях низкогорного рельефа с относительно большой крутизной склонов.

Тот же ряд предикторов (с теми же знаками), что и для мощности гумусового профиля, определяет пространственную изменчивость влажности на глубине 25-30 см, однако крутизна здесь является предиктором с самым большим весом, а наибольший коэффициент корреляции появляется при положении Солнца на юго-западе. Самое большое снижение влажности почвы при азимуте  $225^\circ$  отвечает наблюдениям исследователей относительно сильного прогрева юго-западных склонов. В отличие от влажности верхнего слоя почвы, изменение влажности на глубинах 50 см и 70 см происходит, в первую очередь за счет изменения гидрологически важной МВ - площади сбора, которая связана в свою очередь, как показано выше, с местоположением и гранулометрическим составом почв, а также с глубиной зеркала грунтовых вод.

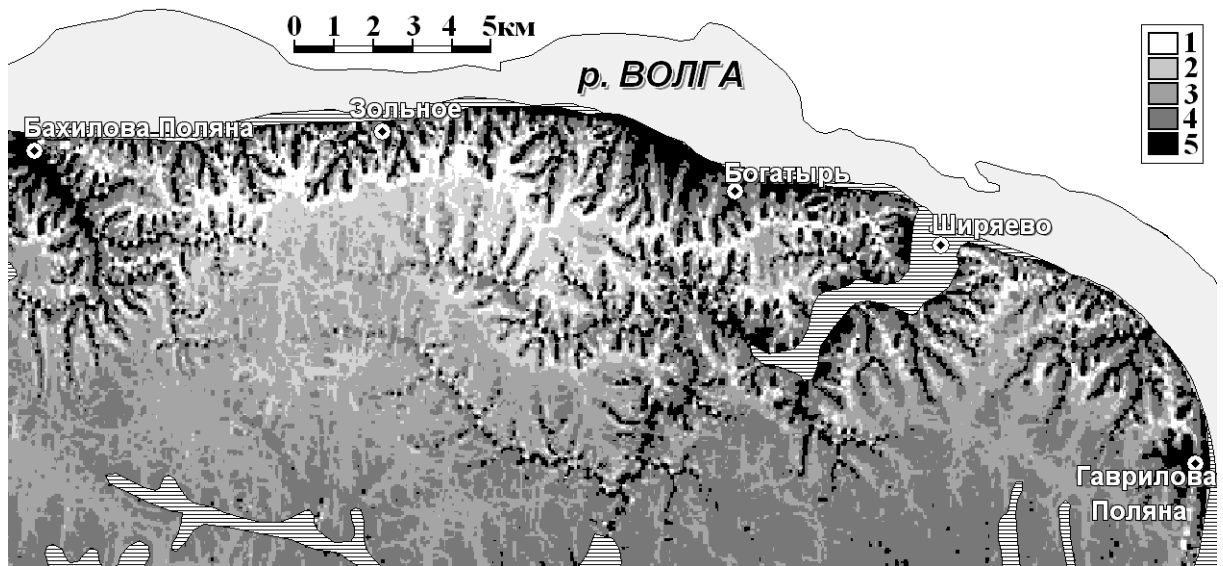
Анализ изменения температуры почвы показал, что на всех глубинах предиктором с самым большим весом является крутизна (табл.2). В двух верхних слоях изменение температуры более всего связано с освещенностью при азимуте  $145^\circ$ . Последнее может быть определено некоторой инерционностью в прогреве почвы: при измерении температуры почвы в верхних слоях около полудня наиболее прогретыми оказываются юго-восточные склоны.

## **6. СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Структурные и функциональные фитоценологических параметры экосистемы показали в целом несколько менее тесную связь с рельефом при уровнях значимости, тем не менее, от  $P < 10^{-6}$  до  $P < 10^{-3}$ .

Группу структурных фитоценологических характеристик можно разделить по знаку связи с освещенностью склонов. Проективное покрытие напочвенного растительного покрова, высота травостоя, количество подроста хвойных и лиственных деревьев, а также количество подлеска имеет прямую зависимость от значения освещенности склонов в качестве ведущего предиктора, см. табл. 2. Пространственное распределение групп биогеоценозов, типов леса, экологических и ценологических групп травостоя, флори-

стического разнообразия травостоя характеризуется отрицательной корреляционной связью с терморежимом склонов. Отметим некоторые особенности пространственного распределения подроста и подлеска, выявленного в ходе анализа. С ростом значения освещенности увеличивается их количество, однако наибольший коэффициент корреляции для каждого из них определен несколько различным азимутом: в ряду подлесков – подрост хвойных – подрост лиственных азимут меняется от  $190^\circ$  до  $240^\circ$ . Эта пространственная дифференциация усиливается зависимостью от площади сбора, выражающейся в том, что количество подроста увеличивается вниз по склону (с ростом площади сбора), а количество подлеска возрастает в обратном направлении.



**Рис. 12. Изображение карты-матрицы индекса упругой устойчивости.**  
 Индекс в долях единицы: 1 – 0,05-0,25; 2 – 0,25-0,35; 3 – 0,35-0,45; 4 – 0,45-0,65; 5 – 0,65-0,95.

Среди функциональных фитоценологических характеристик реже чем среди структурных характеристик фитоценоза встречаются те, которые имеют в качестве ведущего предиктора (с большим весом) освещенность и площадь сбора, см. табл. 2. Общая зеленая фитомасса и масса лесной подстилки увеличиваются на освещенных склонах. Запасы древесины имеют отрицательную связь с ведущими предикторами – площадью сбора, крутизной и прямую – со средневогнутыми формами, характеризуемыми отрицательным знаком средней кривизны. Значения важных показателей функционирования фитоценозов – отношения продуктивности к фитомассе (Одум, 1975) и индекса упругой устойчивости (Коломыц, 1995) возрастают на вогнутых формах рельефа, характеризуемых отрицательными максимальной и горизонтальной кривизнами, располагаясь преимущественно на сравнительно небольшой высоте (рис. 12).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование расширенной системы морфометрических величин (МВ) позволило обнаруживать статистически значимые связи практически для всех изучавшихся характеристик экосистемы при уровне значимости  $P < 10^{-6}$  или  $P < 10^{-5}$ .

Сравнительный анализ рельефа Самарской Луки с другими местностями, в том числе анализ всей Евразии, позволил определить особенности этого уникального низкогорного ландшафта. Самарская Лука представляет собой отдельный В-холм 1-го континентального иерархического уровня. В сравнении с другими В-холмами Среднего Поволжья Самарская Лука характеризуется существенно более низким базисом эрозии. Количественный анализ показал также, что гидротермические условия Самарской Луки характеризуются существенно большей контрастностью условий в пространстве, нежели прилегающие участки территории, что определяет сравнительно большую чувствительность к повышению температуры экосистемы Жигулей.

В работе использованы методы предсказательного экологического картирования, в целом известные, но до сих пор они основывались на сравнительно бедной системе МВ (до шести величин), непригодной для представительного описания рельефа местности.

В работе представлена небольшая часть результатов, относящаяся к статистическому исследованию связей в экосистеме и касающаяся предсказательных карт-матриц, их смысла, выявленных закономерностей и наиболее важных МВ-предикторов.

В отношении представленных здесь результатов можно отметить следующее. Существенную роль в предсказательном экологическом картировании играют для изучавшихся характеристик экосистемы площадь сбора, освещенность и крутизна склонов, как в отношении почв, так и в отношении растительности для контрастных условий низкогорья Жигулей. Полученные в рамках этого подхода карты есть по сути матрицы предсказанных характеристик экосистемы, которые в свою очередь могут являться обширной количественной базой для прогнозов во времени. Все обнаруженные связи являются статистически значимыми и их использование позволит в дальнейшем исследовании в большей мере систематизировать внутренние взаимосвязи в экосистеме на основе количественных подходов, в которых обязательным является *указание статистической достоверности* полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Арманд Д.Л.** Некоторые задачи и методы физики ландшафта / Геофизика ландшафта. М.: Наука, 1967, С.7-24.

**Глазовская М.А.** Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964, 230 с.

**Качинский Н.А.** Физика почвы. Часть 1. М.: «Высшая школа», 1965, 324 с. – Коломыц Э.Г. Организация и устойчивость хвойнолесных экосистем на бореальном экотоне Русской равнины // Известия РАН. Серия географическая, 1995, N.3, С. 37–51. –

- Коломыц Э.Г.** Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
- Неуструев С.С.** (1930). Элементы географии почв / Генезис и география почв. М.: Наука, 1977, С.149-314.
- Обедиентова Г.В.** Происхождение Жигулевской возвышенности и развитие рельефа / М.: Изд-во АН СССР, 1953, 246 с. – **Одум Ю.** Основы экологии. М.: Мир, 1975, 740 с.
- Полынов Б.Б.** Кора выветривания. Часть I. Процессы выветривания. Основные фазы и формы коры выветривания и их распределение. Л.: Изд-во АН СССР, 1934, 243с. – **Проценко Е.П.** Базовые свойства и режимы почв полярно ориентированных склонов // Автореферат дисс... доктора с/х наук, Курск, 2004, 46 с.
- Сибирцев Н.М.** (1900). Почвоведение: курс лекций, читанных студентам Института сельского хозяйства и лесоводства в Новой Александрии / Избранные сочинения. Т.1. Почвоведение. М.: «Сельхозгиз», 1951, 472 с. – **Соболевский П.К.** (1932). Современная Горная Геометрия // Социалистическая реконструкция и наука, 1932, Вып.7, С.42-78. – Воспроизведена в сборнике: Геометрия структур земной поверхности. Пушкино: Пущинский научный центр АН СССР, 1991, С.156-197.
- Шарая Л.С., Шарый П.А.** Элементарные формы в классификациях рельефа, их связь с характеристиками ландшафта Приокско-Террасного заповедника // Известия Самарского научного центра РАН, спец. выпуск «Природное наследие России», Часть 1, 2004, С.102-111. – **Шарый П.А., Шарая Л.С.** Предсказательное картирование: количественные методы индикации свойств ландшафта с использованием геоморфометрии / XI международная ландшафтная конференция «Ландшафтоведение – теория, методы, региональные исследования, практика», 22-25 августа 2006 г., г.Москва / Материалы XI международной ландшафтной конференции, М.: Географический факультет МГУ, 2006, С.76-77.
- Freeman T.G.,** 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid // Computers and Geosciences, V.17, N.3, P.413-422.
- Lees B.G., Van Niel K.P., Laffan S.W.,** 2006. Predictive vegetation mapping and DEM error / International Symposium on Terrain Analysis and Digital Terrain Mapping (TADTM 2006), held November 23-25, 2006, in Nanjing, China. Proceedings of TADTM 2006, P.42-45; full paper: CD-ROM.
- MacMillan R.A., Torregrosa A., Moon D., Coupe R., Philips N.,** 2007. Automated predictive mapping of ecological entities / T.Hengl, H.I.Reuter (Eds.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 22670 EN, 575 pp. – in press. – **Martz L.W., de Jong E.,** 1988. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers and Geosciences, V.14, N.5, P.627-640. – **McBratney A.B., Odeh I.O.A., Bishop T.F.A., Dunbar M.S., Shatar T.M.,** 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey // Geoderma, V.97, N.3-4, P.293-327. – **McKenzie N.J., Ryan P.J.,** 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation / Geoderma, V.89, N.1-2, P.67-94.
- Pennock D.J., Zebarth B.J., de Jong E.,** 1987. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada // Geoderma, V.40, N.3-4, P.297-315. – **Pike R.,** 1995. Geomorphometry – progress, practice, and prospect // Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband V.101, P.221-238. – **Pike R.,** 2002. A Bibliography of Terrain Modelling (Geomorphometry), the Quantitative Representation of Topography – Supplement 4.0. Open-file report 02-465, U.S. Geological Survey, 2002. – Available as .PDF file at this website: <http://wrgis.wr.usgs.gov/wgmt/sfbay/pike.html>
- Schmidt J., Evans I.S., Brinkmann J.,** 2003. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation // International Journal of Geographical Information Science, V.17, N.8, P.797-814. – **Scull P., Franklin J., Chadwick O.A., McArthur D.,** 2003. Predictive soil mapping: a review // Progress in Physical Geography, V.27, N.2, P.171-

197. – **Shary P.A.**, 1995. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, V.27, N.3, P.373-390. – **Shary P.A.**, 2001. Analytical GIS Eco. Website: <http://www.giseco.info/> – **Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.**, 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*, V.107, N.1-2, P.1-32. – **Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V.**, 2005. The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry // *Geografia Fisica e Dinamica Quatrenaria*, V.28, N.1, P.81-101. – **Strahler A.N.**, 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography // *Bulletin of the Geological Society of America*, V.63, P.1117-1141.

**Tomer M.D., Anderson J.L.**, 1995. Variation of soil water storage across a sand plain hillslope. *Soil Science Society of America Journal*, V.59, N.4, P.1091-1100. – **Troeh F.R.**, 1964. Landform parameters correlated to soil drainage // *Soil Science Society of America Proceedings*, V.28, N.6, P.808-812.

Поступила в редакцию  
17 мая 2007 г.