

Гусев А.П. Ландшафтно-экологическая оценка техногенных изменений рельефа // Географические аспекты устойчивого развития регионов. Сборник научных трудов. Гомель: БелГУТ, 2013. – С. 125-132.

УДК 911.2+504.54

## **Ландшафтно-экологическая оценка техногенных изменений рельефа**

А.П. Гусев ([gusev@gsu.by](mailto:gusev@gsu.by))

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты ландшафтно-экологического анализа и оценки последствий техногенных изменений рельефа. На основе карт ландшафтного покрова и цифровых моделей рельефа тестовых участков изучено влияние изменений рельефа на ландшафтно-экологические условия. Выявлено, что при техногенной трансформации рельефа изменяется топографический индекс влажности территории, увеличивается эрозионный потенциал и вертикальная расчлененность.

**Ключевые слова:** ландшафтный покров, техногенная трансформация рельефа, ландшафтные метрики, фрагментация, морфометрические индексы

### **Введение**

Рельеф выступает важным ландшафтно-экологическим фактором: детерминирует природную дифференциацию геосистем, формируя их морфолитогенную основу; обуславливает развитие ряда экзогенных геологических процессов (эрозия, оврагообразование, оползни и т.д.); влияет на распределение вещественно-энергетических потоков в иерархии геосистем, в том числе на миграцию загрязняющих веществ, растений и животных; является фактором устойчивости геосистем; изменения рельефа во времени – активный фактор динамики геосистем и их компонентов и т.д.

Целью исследований в данной работе являлась оценка влияния техногенной трансформации рельефа на ландшафтно-экологические условия. В ходе исследований решались задачи: анализ динамики ландшафтного покрова; оценка влияния техноморфогенных преобразований на структуру ландшафтного покрова с помощью ландшафтных метрик; создание цифровых моделей рельефа тестовых участков; оценка влияния техноморфогенных преобразований на ландшафтно-экологические условия - влажность, эрозионный потенциал, расчленённость рельефа.

### **Материалы и методы**

Район исследований находится на юго-востоке Белоруссии (город Гомель и прилегающие территории). Исследования проводились на 4 тестовых участках (площадь каждого 4 км<sup>2</sup>) на двух временных срезах: до техноморфогенных преобразований (1-я половина XX века); после техноморфогенных преобразований (начало XXI века).

Тестовый участок «ГХЗ» – промплощадка, водоемы-отстойники, полигон отходов фосфогипса Гомельского химического завода (35% всей площади) и прилегающие территории с лесными и сельскохозяйственными землями; расположен на западе города Гомеля; высота отвалов – 20-30 м; площадь, занятая отвалами, составляет около 100 га.

Тестовый участок «Уза» – надпойменная терраса и пойма рек Уза и Сож с полигоном твердых бытовых отходов (ТБО), полями фильтрации, лесными и сельскохозяйственными землями; расположен вблизи деревни Уза, на западе города Гомеля; высота отвалов ТБО составляет – до 10 м; площадь – 35 га.

Тестовый участок «Осовцы» – надпойменная терраса и пойма реки Сож с карьером по добыче строительных песков; расположен в юго-западной части города Гомеля; глубина разработки – до 10 м; площадь нарушенных земель – более 80 га.

Тестовый участок «Волотова» – намывной массив в пойме реки Сож и прилегающие территории; расположен в восточной части города Гомеля; мощность намывных песков – до 6 м; создан в градостроительных целях в 1980-е гг.

Для разработки карт ландшафтного покрова использовались топографические карты масштаба 1:100000 (1923-1931 и 1985-1988 гг.), космоснимки Landsat (2005-2007 гг.) и материалы Google Earth (2006). Привязка и оцифровка растров выполнялись в Quantum GIS 1.6.0. Карты ландшафтного покрова учитывали следующие типы землепользования: жилая городская застройка, жилая сельская застройка, промышленная застройка, полигоны отходов, транспортные коммуникации, обрабатываемые земли, луга, кустарники, болота, леса. Для вычисления ландшафтных метрик использовался программный продукт FRAGSTATS 4.0 [3].

В работе использованы следующие ландшафтные метрики: Edge Density (ED), Patch Area Distribution (AREA), Landscape Shape Index (LSI), Shape Index Distribution (SHAPE), Interspersion & Juxtaposition Index (IJI), Splitting Index (SPLIT), Effective Mesh Size (MESH), Shannon's Diversity Index (SHDI), Simpson's Diversity Index (SIDI). Подробное описание данных метрик приводится в [2,3].

Цифровые модели рельефа (ЦМР) тестовых участков разработаны на основе топографических карт масштаба 1:5000-1:10000 с помощью ГИС SAGA (System for Automated Geo-Scientific Analysis [1]) методом Natural Neighbour (размер ячейки 20 м). Оцифровка высотных отметок и изолиний – в Quantum

GIS 1.6.0. Для каждого тестового участка созданы две ЦМР (до и после техноморфогенных преобразований).

С помощью ГИС SAGA производился расчет морфометрических индексов: TWI (Topographic Wetness Index – топографический индекс влажности); LSF (LS factor – эрозионный потенциал рельефа); TRI (Topographic ruggedness index – топографический индекс расчлененности). TWI – отображает потенциальную влажность водосбора и представляет собой натуральный логарифм отношения дренажной площади к тангенсу крутизны склона. Большие значения этого индекса соответствуют аккумуляции влаги, повышенному ее содержанию в почве, что, в свою очередь, влияет на другие почвенные характеристики, микроклимат, водный баланс и т.д. Этот индекс широко используется для прогноза почвенных характеристик на основе ЦМР. LSF – относительный показатель эрозии, учитывающий уклон поверхности и площадь водосборного бассейна (эрозионный потенциал рельефа). Считается индикатором способности водного потока вызывать эрозию. Эрозионный потенциал рельефа представляют собой важный ландшафтно-экологический показатель, имеющий существенное значение при планировании землепользования, организации охраны земель и водных объектов, оценке эрозионной сети и т.д. TRI – топографический индекс расчлененности или шероховатости, показывает среднее значение перепада высот между анализируемой ячейкой и восемью соседними (характеризует относительную локальную вертикальную расчлененность рельефа).

### **Результаты и их обсуждение**

Техногенные преобразования рельефа и сопряженные с ними изменения землепользования отражаются в структуре ландшафтного покрова (табл. 1). Наиболее чувствительная реакция на эти изменения характерна для ландшафтных метрик, измеряющих фрагментацию ландшафтного покрова. На всех участках произошло увеличение фрагментации: значения ED увеличились в 1,6-3,4 раза; значения AREA уменьшились – 1,7-3,9 раза. Метрики ED (плотность краев или границ) и AREA (средняя площадь пятна) оценивают фрагментацию ландшафта, т.е. процесс дробления континуума ландшафтного покрова или его элементов деятельностью человека (рост фрагментации отражается увеличением ED и уменьшением AREA). Видно, что до морфотехногенных преобразований значения метрики ED отличались в 4,6 раза, после преобразований – только в 2,3 раза, т.е. фрагментация ландшафтного покрова увеличилась на всех участках и стала более равномерной. Метрика LSI оценивает нерегулярность формы пятен. На рассматриваемых участках значения LSI увеличились 1,4-2,4 раза (в наибольшей степени изменились значения LSI на участке «Уза»).

MESH и SPLIT являются метриками, которые оценивают раздробленность ландшафтного покрова. SPLIT=1, а значения MESH максимальны, когда на территории ландшафта представлен только один тип землепользования. При росте фрагментации значения SPLIT увеличиваются, а MESH уменьшаются. Видно, что для всех тестовых участков характерно уменьшение значений MESH (в 1,7-4,3 раза) и увеличение значений SPLIT (1,7-4,3 раза).

Таблица 1

## Изменение ландшафтной структуры тестовых участков

Ландшафтные метрики	Тестовые участки			
	«ГХЗ»	«Уза»	«Осовцы»	«Волотова»
ED	45,1*	91,0	104,2	73,5
	14,1**	26,6	64,6	45,9
LSI	3,3	5,6	6,3	4,7
	1,7	2,3	4,3	3,3
AREA	20,5	8,4	7,7	15,1
	80,2	30,8	18,5	25,2
MESH	67,6	33,7	27,8	69,4
	170,7	144,8	87,6	120,1
SPLIT	6,1	12,0	14,7	5,9
	2,3	2,8	4,6	3,4
SHDI	1,78	1,81	1,99	1,58
	0,93	1,17	1,45	1,17

Примечание. \* - до морфотехногенных преобразований; \*\* - после морфотехногенных преобразований.

Произошло также увеличение разнообразия ландшафтного покрова, на что указывает рост значений метрик разнообразия – SHDI (индекс разнообразия Шеннона) и SIDI (индекс разнообразия Симпсона). В наибольшей степени изменилось разнообразие ландшафтного покрова на участке «ГХЗ»: индекс разнообразия SHDI увеличился в 1,9 раза (табл. 1).

Не обнаружено влияние техногенных преобразований рельефа и изменений землепользования на SHAPE (метрика оценивает форму пятен – увеличение значений указывает на рост сложности формы пятен) и ПИ (оценивает конфигурацию ландшафта, показывая отношение гетерогенности типов землепользования к максимальной их гетерогенности). Значения этих метрик на одних участках увеличились, а на других – уменьшились.

В течение рассматриваемого периода времени фрагментация ландшафтного покрова существенно возросла на тестовых участках «ГХЗ», «Уза», «Осовцы», в меньшей степени – на участке «Волотова». Рост фрагментации обусловлен комплексом факторов (развитие сети транспортных

коммуникаций, промышленное и городское строительство, лесохозяйственные мероприятия и т.д.) и отражает их совокупный эффект. Техноморфогенные преобразования влияют на структуру ландшафтного покрова как напрямую (непосредственно – изменения площадей ареалов различных типов землепользования при создании полигонов отходов, карьеров и т.д.), так и косвенно (за счет создания инфраструктуры, обслуживающей указанные объекты). Так, создание полигона отходов фосфогипса сопряжено с созданием всего комплекса Гомельского химического завода (застройка пахотных и лесных земель, осушение заболоченных участков, прокладка транспортных коммуникаций и т.д.); создание полигона ТБО сопровождалось сооружением шламонакопителей, транспортных коммуникаций и т.д. Во всех случаях, площадь территории, затронутой изменениями ландшафтного покрова, существенно превышает площадь территории с измененным рельефом.

Главным последствием техноморфогенной трансформации на ландшафтном уровне является рост фрагментации ландшафтного покрова. Фрагментация одновременно приводит к снижению общей площади местообитаний (потеря местообитаний) и увеличение степени изоляции оставшихся местообитаний (собственно фрагментация или изоляция местообитаний). Фрагментация – важный индикатор состояния окружающей среды. Экологические последствия ландшафтной фрагментации на экосистемном уровне выражаются: в изменении пространственного распределения энергии и вещества в ландшафте; в нарушении межэкосистемных горизонтальных потоков энергии и вещества; в трансформации поверхностного энергетического баланса, особенно на границах пятен (например, изменения альбедо, температуры и влажности почвы, направления ветра); в воздействии на популяции животных и растений.

Для оценки ландшафтно-экологических изменений, обусловленных техногенной трансформацией рельефа, нами были также использованы морфометрические индексы, рассчитываемые на основе ЦМР. Указанные показатели могут использоваться для оценки риска экзогеодинамических процессов (табл. 2).

Таблица 2

Оценка риска экзогеодинамических процессов на основе морфометрических индексов

Индекс	Экзогеодинамический процесс	Признаки
Topographic Wetness Index	подтопление	Высокие значения WI – высокая влажность почв и грунтов
LS factor	Водная эрозия	Высокие значения LSF – высокий эрозионный

		потенциал рельефа
Topographic ruggedness index	Водная эрозия, гравитационные процессы	Высокие значения TRI – увеличение риска эрозионных и гравитационных процессов

Анализ TWI позволяет выявить пространственно-временные изменения влажности экотопов, которые, в свою очередь, отражаются на структуре растительного покрова территории. Видно, что морфотехногенные преобразования в пределах тестовых участков вызвали изменение влажности (табл. 3).

Таблица 3

Площадное распределение значений морфометрических индексов (в % от общей площади)

Индексы	Тестовые участки			
	«ГХЗ»	«Уза»	«Осовцы»	«Волотова»
TWI				
Высокий (более 7,6)	26,1* 31,4**	17,7 17,1	25,2 18,1	28,4 41,1
Средний (4,8-7,6)	10,8 10,2	37,3 44,9	31,7 38,0	38,7 29,8
Низкий (до 4,8)	63,5 58,5	45,0 38,0	43,2 44,9	33,0 29,0
LSF				
Высокий (более 1,50)	55,3 45,2	36,2 31,8	29,5 27,2	25,4 26,5
Средний (0,76-1,50)	13,5 19,1	19,3 22,1	19,8 23,8	11,5 11,8
Низкий (до 0,76)	31,2 35,7	44,5 46,1	50,7 49,0	63,1 61,6
TRI				
Высокий (более 0,4)	64,0 54,5	36,7 26,4	35,8 25,4	27,7 14,0
Средний (0,2-0,4)	12,6 19,3	23,4 36,8	19,7 35,8	16,7 32,2
Низкий (до 0,2)	23,4 26,2	39,9 36,8	44,5 38,9	55,6 53,8

Примечание. \* - до морфотехногенных преобразований; \*\* - после морфотехногенных преобразований.

Так, на территории участка «ГХЗ» удельная площадь с высокими значениями TWI («влажные» местообитания, заболоченные земли) уменьшилась на 5,3% (21,2 га) и соответственно увеличилась площадь ареалов с низкими значениями TWI («слабоувлажненные» местообитания, характеризующиеся низкой влажностью почв, большой глубиной залегания грунтовых вод). На территории участка «Волотова» удельная площадь ареалов с высокими значениями TWI сократилась на 12,7% (50,8 га), что обусловлено созданием положительных форм рельефа на месте заболоченной поймы. Соответственно, увеличились площади ареалов с низкими и средними значениями TWI.

На участке «Осовцы», наоборот, произошло увеличение площади экотопов с повышенной влажностью (на 7,1% или 28,4 га). На участке «Уза» удельная площадь ареалов с высоким TWI изменилась слабо, но увеличилась удельная площадь ареалов с низкими TWI. Таким образом, на данном масштабном уровне (первые км<sup>2</sup>) эффект техноморфогенеза четко фиксируется в поле значений TWI.

На основе анализа карт распределения значений LSF была выполнено изучение влияния техногенной трансформации рельефа на эрозионный потенциал. Наблюдается повышение площади с высоким эрозионным потенциалом: «ГХЗ» - на 10,1% (40,4 га); «Уза» – 10,3% (41,2 га); «Осовцы» – 2,3% (9,2 га). На участке «Волотова», наоборот, создание намывного массива привело к небольшому снижению площади ареалов с высоким эрозионным потенциалом (табл. 3). Оценка изменений LSF показывает, что результате морфотехногенных преобразований на участках «ГХЗ» и «Уза» увеличился риск эрозионных процессов.

Анализ TRI показывает изменения гетерогенности морфогенной основы. На всех тестовых участках техноморфогенные преобразования вызвали рост локальной вертикальной расчлененности рельефа: увеличились удельные площади с высокими значениями TRI (табл. 3). На участках «ГХЗ», «Уза», «Осовцы» площади ареалов с высокими значениями TRI увеличились примерно на 10% (40 га), а на участке «Волотова» – на 13,7% (55 га).

Указанные изменения имеют как положительные, так и отрицательные экологические последствия. Однозначно негативным следует считать увеличение площади ареалов с высоким эрозионным потенциалом. С этих позиций морфотехногенные преобразования на участке «ГХЗ» являются наиболее экологически опасными. В этом случае отсутствие растительного покрова (вследствие токсичности отвалов фосфогипса) значительно увеличивает риск эрозионных процессов. Увеличение вертикальной расчлененности рельефа на участке «ГХЗ» также имеет негативные последствия, так затрудняет как естественное, так и искусственное восстановление растительности.

## **Выводы**

Техноморфогенные нарушения геосистем и связанная с ними трансформация землепользования отражаются в изменениях структуры ландшафтного покрова, которые количественно могут быть оценены с помощью ландшафтных метрик. Установлено, что создание техногенных форм рельефа (отвалы твердых отходов, карьеры, намывные массивы) и развитие связанной с ними инфраструктуры вызывает рост фрагментации ландшафтного покрова. В зависимости от характера техногенных форм рельефа и исходных условий влажность территории может и увеличиваться, и уменьшаться, что отражается в распределении значений топографического индекса влажности. Создание отвалов твердых отходов и карьеров вызывает рост эрозионного потенциала территории в целом. На всех изучаемых объектах имеет место увеличение вертикальной расчлененности рельефа, фиксируемое в значениях топографического индекса расчлененности. Реальное проявление негативных последствий этих изменений зависит от состояния растительного покрова.

## **Список литературы**

1. Conrad O. SAGA – program structure and current state of implementation / O. Conrad // *Göttinger Geographische Abhandlungen*. – 2006. – Vol. 115. – P. 39-52.
2. Cushman S.A. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency / S.A. Cushman, K. McGarigal, M.C. Neel // *Ecological Indicators*. – 2008. – Vol. 8. – P. 691–703.
3. McGarigal K. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, project homepage [Electronic resource] / K. McGarigal, S.A. Cushman, M.C. Neel, E. Ene / University of Massachusetts. – Amherst, 2002. – Mode of access: <[http:// www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html](http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html). – Date of access: 12.09.2012.

## **Technogenic Transformations of a Relief and its Landscape-ecological Consequences**

**A.P. Gusev**

In article results of the landscape-ecological analysis of technogenic transformation of a relief are considered. On the basis of maps of a landscape cover and Digital Elevation Model of test sites impact technogenic relief on landscape-ecological conditions is studied. It is established that creation of technogenic forms of a relief and their infrastructure causes increase of a landscape fragmentation. It is revealed that at technogenic transformation of a relief the Topographic Wetness Index of territory changes, the erosion potential and ruggedness increases.

**Key words:** geosystem, technogenic transformation of a relief, landscape metrics, fragmentation, morphometric index



