

геоэкологические аспекты воздействия МГЭС на окружающую среду и дать экспертную интегральную социально-эколого-экономическую оценку условий реализации проектов в Алтайском крае.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-98003 р\_сибирь\_а «Геоэкологические аспекты эффективного энергообеспечения удалённых территорий на основе использования возобновляемых источников энергии (на примере развития малой гидроэнергетики в Алтайском крае)».

#### Библиографический список

1. Документы «группы восьми» // Гражданская восьмерка. civilg8. – <http://civilg8.ru/6443.php>.
2. Протокол по вопросам энергетической эффективности и соответствующим экологическим аспектам (ПЭЭСЭА). – Лиссабон, 1994. Вступил в силу в 1998.
3. Поздеев В.Б. Становление и современное состояние геоэкологии. – Смоленск: Маджента, 2004. – 324 с.
4. Федянин В.Я., Бородин Д.В. Основные направления развития малой гидроэнергетики Алтайского края // Ползуновский вестник. – 2012. – №4. – С. 178-181.
5. Государственная программа «Энергоэффективность и развитие электроэнергетики» на 2015-

2020 годы. Утв. Пост. Администрации Алтайского края №468 от 13 октября 2014 г.

6. Технический отчет об изучении рек Алтайского края: Материалы, подготовленные Фондом «Новая энергия». – М., 2008. – 13 с.

7. Директор «Алтайского регионального центра нетрадиционной энергетики и энергосбережения» Дмитрий Бородин: Мифы и реальность Чарышской МГЭС. 01.08.2013 19:41 // Информационное агентство «Банфакс». – <http://www.bankfax.ru/OPINIONS/89491/>.

8. Строительство малых ГЭС в Алтайском крае под угрозой срыва. 23 октября 2012, 07:15 // Алтайпресс.ru. – <http://altapress.ru/story/95755>.

9. Алтайский край – перспективный туристический регион России. Дата публикации: 22.03.2010 г. Дата изменения: 30.08.2014 г. // Официальный сайт Алтайского края. – <http://www.altairregion22.ru/info/tour/altai/>.

10. РД 153-34.2-02.409-2003. Методические указания по оценке влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду.

11. Троицкий А.В. Природоохранные проблемы в гидроэнергетике // Энергия. – 2004. – № 5. – С. 29-34.

12. Егидарев Е.Г. Геоэкологические оценки проблемы освоения гидроэнергетических ресурсов бассейна реки Амур: Дисс. на соиск. степ. канд. геогр. наук. – Владивосток, 2013.

УДК 502.11:911.53 (571.150)

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ В БАССЕЙНЕ Р. КАСМАЛА (АЛТАЙСКИЙ КРАЙ)

Черных Дмитрий Владимирович, Бирюков Роман Юрьевич, Золотов Дмитрий Владимирович,  
Першин Дмитрий Константинович

**Ключевые слова:** ландшафт, дистанционное зондирование, ландшафтные метрики, земные покровы, матрицы переходов, Алтайский край.

#### Введение.

В последние десятилетия в связи с глобальными экологическими изменениями исследования пространственно-временной динамики ландшафтов особенно актуальны для выявления изменений состояния наземных покровов, вызванных как антропогенными, так и природными факторами. При изучении динамики ландшафтов и их компонентов используются различные методы, взаимодополняющие друг друга и позволяющие изучить

разновременные изменения. При этом корректную объективную пространственную картину на больших территориях можно получить только с использованием данных дистанционной аэрокосмической съемки. Для изучения качественных и количественных модификаций и трансформаций ландшафтов необходимо провести анализ временных рядов спутниковых изображений. Анализ разновременных карт и снимков, фиксирующих состояние объектов в разные моменты времени является одним

из основных способов отображения динамики явлений и процессов в традиционной картографии. Он позволяет судить о моменте возникновения объекта, его развитии, изменении во времени и перемещении в пространстве [1; 2].

Использование современных высоко технологичных средств анализа и интерпретации данных, математического аппарата и программного обеспечения значительно расширяет спектр возможностей изучения пространственно-временных изменений природной среды. Детальность структурных изменений во многом детерминирована масштабом картографирования. В нашем случае точность определяется временным аспектом (использование снимков трех временных срезов) и пространственным разрешением снимков (30 м).

Среди традиционных задач, решаемых с помощью дешифрирования аэрокосмических снимков, значится изучение динамики границ лесных земель и степени нарушения непрерывности (фрагментации) лесного покрова, тематическое картографирование и инвентаризация лесов в целях контроля порядка лесопользования и хода лесовозобновления на вырубках и гарях.

Комплексный анализ динамики ландшафтов при сопоставлении разновременных космических снимков одной и той же местности позволяет получить точные данные о пространственных механизмах переходов одних структурных элементов в другие в процессе как разрушительных, так и восстановительных смен. При комплексном анализе динамики сложных ансамблей природных систем осуществляется построение вектора начальных состояний исходного срока съемки, затем по снимкам последующего срока съемки составляется вектор конечного состояния системы [3].

Главной операцией комплексного анализа динамики является составление матриц, отражающих частоту прямых и обратных переходов контуров разных классов экосистем один в другой на снимках разных лет.

В иностранной и отечественной литературе широко используется термин «ландшафтное разнообразие» (ЛР – landscape diversity), рассматриваемый в контексте неоднородности ландшафтного покрова. Существует много способов изучения ЛР. Все они, в той или иной степени, основаны на анализе нескольких групп геометрических особенностей – состава, формы, ориентировки, метрических и топологических особенностей взаиморасположения [4; 5].

#### **Обоснование территории исследования.**

Исследования проводились в Касмалинской ложбине древнего стока на Приобском плато. Ложбина занимает центральную часть бассейна р. Ка-

смала, и разделяет обращенные к ней макросклоны Кулундинско-Касмалинского и Касмалинско-Барнаульского увалов. Выбор территории обусловлен рядом причин, отмеченных в работе [6; 7]. Кроме того, необходимо отметить, что расположенные здесь ленточные боры служат важнейшей сырьевой базой региона. Лесопользование является одним из наиболее мощных факторов воздействия на лесные экосистемы, что говорит о необходимости получения полной и актуальной информации о масштабах и пространственно-временных характеристиках этого объекта.

#### **Методика исследований.**

На первоначальном этапе работ [6] (рис. 1) на территорию Касмалинской ложбины древнего стока в пределах модельного бассейна были построены карты наземных покровов для трех временных срезов. Карты строились на основе автоматизированного дешифрирования серии снимков Landsat (съемка 21.06.1990 г., 01.08.1999 г и 20.06.2010 г.). Хотя временной отрезок используемой съемки не велик (20 лет), необходимо учитывать, что скорости и масштабы динамики наземных покровов значительно увеличились именно в исследуемый временной период. По данным космической съемки Landsat возможно достаточно точное определение наземного покрова и преобладающей породы лесов. Кроме того, применение временной серии снимков позволяет определить возраст насаждений на месте гарей, рубок и других повреждений, если лес на этих территориях был уничтожен полностью [8; 9; 10].

На следующем этапе работ был проведен количественно-качественный анализ отмеченных пространственно-временных изменений.

В результате оверлейных операций получены матрицы переходов наземных покровов, на основе которых построены графы переходов. Данный метод регистрирует динамику наземных покровов и описывает количественно прямые и обратные переходы во временных сериях.

#### **Результаты и обсуждение.**

В процессе автоматизированного дешифрирования снимков Landsat и группировки кластеров по тематическим классам для территории исследования было выделено 10 типов наземных покровов [6]: 1 – водная поверхность озер и прудов; 2 – займища, болота, заболоченные луга; 3 – согры мелколиственные; 4 – леса сомкнутые сосновые; 5 – леса сомкнутые мелколиственно-сосновые; 6 – леса сомкнутые сосново-мелколиственные; 7 – леса разреженные сосновые и мелколиственно-сосновые; 8 – вторичные послелесные луга; 9 – несомкнутые псаммофитные группировки; 10 – застроенные тер-



Рисунок 1. Алгоритм анализа пространственно-временных изменений наземных покровов на модельном участке

ритории. В работе проиллюстрированы изменения в их пространственной структуре за два временных периода.

Создание таблиц площадей в разные годы является первым шагом изучения динамики сложных систем. Такие таблицы иллюстрируют трассы динамики каждого отдельного класса. Однако для четкого представления пространственно-временной динамики ландшафтов этого недостаточно – необходимо знать все взаимные переходы между классами и связать эти трассы в единую динамическую систему [11].

На рисунках 2 и 3 показаны матрицы переходов различных типов наземных покровов в периоды 1990–1999 гг. и 1999–2010 гг. При отражении результатов необходимо учитывать ошибки тематиче-

ского дешифрирования, ошибки пространственного наложения, ошибки графического представления данных и другие технологические неточности. Исходя из этого, был введен порог частоты значимых переходов. Если частота прямого или обратного перехода менее 5,0% данные о пространственно-временном изменении мы считаем недостоверными и исключаем из анализа.

При анализе переходов наземных покровов отмечается один-два ярко выраженных максимума переходов. Это, по большей части, переходы наземных покровов «самих в себя», что говорит об относительной устойчивости данных типов.

По устойчивости исходного состояния типы наземных покровов сгруппированы в 3 класса: стабильные, относительно устойчивые и динамические

→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	89.4	4.1	1.4	1.8	0.2	0.1	0.1	2.3	0.4	
2	0.0	44.7	45.4	0.2	1.0	2.1	0.1	4.6	1.6	
3	0.0	5.3	80.8	0.2	0.9	9.2	0.1	3.1	0.2	
4	0.0	0.2	0.1	85.9	7.0	0.1	5.1	1.5	0.0	
5	0.0	0.2	0.6	26.8	54.8	1.1	13.3	2.9	0.1	
6	0.0	1.9	10.5	0.6	33.3	44.2	0.4	8.7	0.1	
7	0.0	6.2	3.2	0.8	26.4	10.2	1.4	50.1	1.5	
8	0.1	32.6	8.3	0.2	1.3	3.5	0.1	43.0	10.7	
9	0.2	8.9	0.5	0.4	0.5	0.1	0.1	15.6	73.6	
10										100.0

Рисунок 2. Матрица переходов наземных покровов (%) в период 1990–1999 гг.

→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	95.7	1.3	0.2	0.5	0.3	0.3	0.1	1.3	0.1	
2	1.0	49.1	22.2	0.3	1.9	3.1	0.8	19.6	1.9	
3	0.2	7.1	75.9	0.1	6.3	7.3	1.5	1.4	0.0	
4	0.1	0.1	0.3	40.8	11.1	0.3	45.9	1.2	0.1	
5	0.0	0.4	2.4	2.2	64.7	5.6	23.0	1.4	0.0	
6	0.0	0.9	17.4	0.0	65.1	13.3	2.1	0.8		
7	0.0	0.1	0.3	7.2	11.5	0.3	78.2	2.1	0.0	
8	0.4	11.2	14.3	0.6	26.5	15.1	11.5	19.2	1.1	
9	0.3	14.3	2.6	0.2	1.0	1.6	0.7	47.5	31.5	
10										100.0

Рисунок 3. Матрица переходов наземных покровов (%) в период 1999–2010 гг.

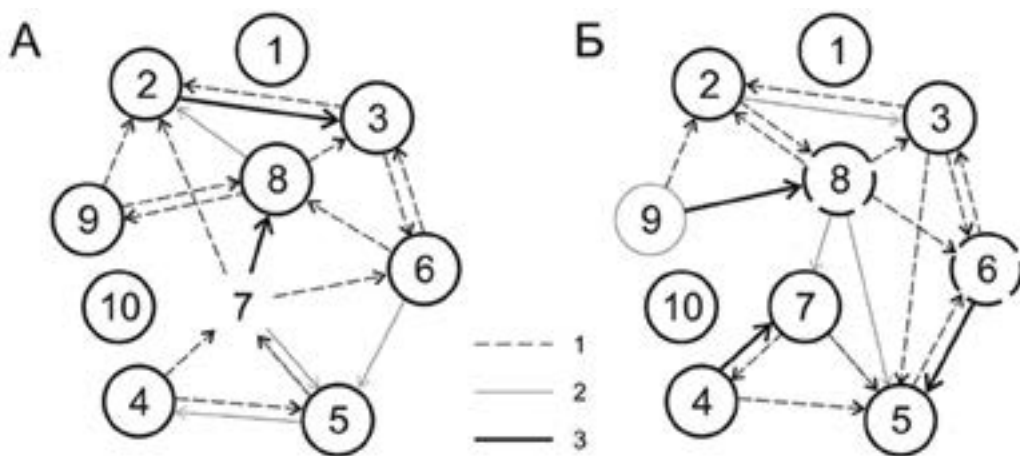


Рисунок 4. Ориентированные графы матриц переходов наземных покровов в периоды 1990–1999 гг. (А), 1999–2010 гг. (Б). Условные обозначения: нет линии – переход исходного класса в конечный менее 5% (ошибка), пунктир – 5–20%, тонкая сплошная линия – 20–40%, толстая сплошная – более 40%

Для количественной оценки ландшафтного покрова в трех временных срезах использовался ряд показателей, по большей части отражающих распределение площади контуров, их числа и формы (Табл. 1). Любая неоднородность, в том числе ЛР, может быть оценена как мера дисперсии либо как мера энтропии [12]. Для оценки разнообразия применяется множество индексов, но все они, по сути, являются вариациями двух формул: дисперсии и энтропии. К числу наиболее популярных индексов разнообразия относятся индексы Шеннона (SHDI) [13] и Симпсона (SIDI) [14] наиболее часто используемые как для сравнения разных территорий, так и для оценки временных изменений в пределах одной [4; 11; 15].

Индекс Шеннона основан на формуле энтропии, учитывает однородность распределения типов наземных покровов и рассчитывается по формуле:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \times \ln P_i), (1)$$

где  $p_i$  – площадь территории в долях, занятая  $i$ -м выделом.

С помощью индекса Шеннона можно оценить не только выравненность площадей, но и равномерность распределения числа их контуров, или энтропийную меру разнообразия ландшафтного рисунка [4].

Индекс Симпсона часто используют в экологии для оценки биоразнообразия внутри экосистемы. В математическом анализе морфологии ландшафтов этот индекс может быть применён для оценки вероятности принадлежности к различным типам геосистем любых двух ландшафтных контуров, случайно отобранных из неопределённо большого их числа. Вычисляется по формуле:

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2, (2)$$

где  $p_i$  – площадь территории в долях, занятая  $i$ -м выделом.

Значения индексов меняются за рассматриваемый период незначительно, и их изменения имеют схожие тенденции (табл. 1: – SHDI, SIDI).

Таблица 1

## Пространственно-временные изменения ландшафтного покрова

Показатели		1990 г.	1999 г.	2010 г.
Площади типов НП, км <sup>2</sup>	1	5,0	4,6	5,0
	2	32,7	27,6	22,7
	3	20,6	45,5	57,5
	4	31,2	65,1	31,1
	5	139,1	116,0	130,2
	6	100,0	50,6	22,8
	7	11,6	20,8	78,7
	8	25,2	33,0	19,4
	9	5,2	7,5	3,3
	10	3,3	3,3	3,3
Ландшафтные индексы и метрики				
LPI		6,2773	2,7098	2,9287
ED		125,2170	140,4562	130,2118
LSI		63,5287	70,8848	65,9368
AREA_MN		5,8929	4,4072	5,377
SHAPE_MN		1,4834	1,4835	1,4963
PARA_MN		546,7006	539,1380	540,7398
CONTIG_MN		0,5362	0,5423	0,5414
ENN_MN		156,3878	133,8773	148,8606
CONTAG		46,6859	40,3892	43,9641
IJI		61,1873	69,8935	64,9765
DIVISION		0,9875	0,9953	0,9949
MESH		465,2692	173,9918	191,9875
SPLIT		80,2492	214,5928	194,4806
SHDI		1,7486	1,9357	1,8249
SIDI		0,7663	0,8234	0,7935

Кроме Индексов разнообразия Шеннона и Симпсона в работе использованы следующие ландшафтные метрики: Largest Patch Index (LPI), Edge Density (ED), Patch Area Mean (AREA\_MN), Landscape Shape Index (LSI), Shape Index Distribution (SHAPE), Perimeter-Area Ratio Distribution (PARA), Contiguity Index Distribution (CONTIG), Contagion Index (CONTAG), Interspersion & Juxtaposition Index (IJI), Splitting Index (SPLIT), Effective Mesh Size (MESH), Euclidean nearest neighbor distance (ENN), Landscape Division Index (DIVISION), Shannon's Diversity Index (SHDI), Simpson's Diversity Index (SIDI). Подробное описание данных метрик приводится в [5].

В результате анализа в пределах Касмалинской ложбины древнего стока отмечается увеличение разнообразия по индексам Шеннона и Симпсона, а также высокая степень корреляции между ними. Анализ группы метрик (ED, AREA, LSI, SPLIT) комплексно указывает на значительное увеличение

фрагментации в 1999 г. по сравнению с 1990 г. и некоторое уменьшение ее в 2010 г.

**Выводы.**

Современные методы и программные средства позволили провести анализ разновременных космических снимков и с приемлемой точностью дать качественную и количественную характеристику неоднородности наземных покровов в трех временных срезах.

1. Все метрики хорошо коррелируют между собой, выявляя резкое нарастание фрагментации от 1990 г. к 1999 г. и незначительное ее снижение к 2010 г.

2. Фрагментация ландшафтов в Касмалинской ложбине древнего стока связана с антропогенным воздействием (рубки, пожары) и неравномерным восстановлением после него.

Работа выполнена в рамках проекта «Изучение антропогенной модификации и трансформации

ландшафтов Алтайского края методами дистанционного зондирования как основа для экологического мониторинга» при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ №13-05-98020 р\_сибирь\_a)

**Библиографический список.**

1. Берлянт А.М. Геоиконика. М.: Фирма Астерия, 1996. 208 с.
2. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М.: Изд. Моск. ун-та, 1991. 206 с.
3. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
4. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
5. McGarigal K., Cushman S.A., Neel M.C., Ene E. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts. Amherst, 2002: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
6. Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А. Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования // Вестник алтайской науки. 2014. №1. С. 233–240.
7. Золотов Д.В., Черных Д.В. Репрезентативность модельного бассейна р. Касмалы для сравнительных

ландшафтно-гидрологических исследований на Приобском плато // Изв. АлтГУ. 2014. № 3/1. С. 133–138.

8. Баргалева С.А., Жирин В.М., Ершов Д.В. Сравнительный анализ данных спутниковых систем Космос-1939, SPOT и Landsat-TM при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса. 1995. №1. С. 101–114.
9. Терехин Э.А. Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исследования Земли из космоса. 2012. №2. С. 53–61.
10. Tuominen S., Naakana M. Landsat TM imagery and high altitude aerial photographs in estimation of forest characteristics // *Salvia Fennica*. 2005. P. 573–584.
11. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
12. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
13. Shannon C., Weaver W. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 1949.
14. Simpson E.H. Measurement of diversity // *Nature*. 1949. 163:688.
15. Steinhard U., Herzog F., Lausch A., Muller E., Lehmann S. Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation // *Environmental Induces – System Analysis Approach*. Oxford: EOLSS Publ., 1999. P. 237–254.