

(63)

ISSN 1814-3520

№4  
2012

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского Государственного Технического Университета, 2012





УДК 528.06

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ (LANDSAT) И РАДАРНЫХ (SRTM) СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ****Б.З.Цыдыпов<sup>1</sup>, И.А.Миронов<sup>2</sup>, А.И.Куликов<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Байкальский институт природопользования СО РАН,  
670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.<sup>2,3</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,  
670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

На примере полигона-трансекта в Баргузинской котловине (Республика Бурятия) выполнен совместный анализ морфометрических характеристик рельефа и результатов обработки мультиспектральных данных с использованием геоинформационных методов. Произведена автоматизированная классификация природных сред и пространственное топографическое моделирование рельефа. Осуществлен сравнительный анализ результатов мультиспектральной классификации, моделирования рельефа и полевых работ.

Ил. 9. Табл. 3. Библиогр. 9 назв.

*Ключевые слова: мультиспектральная классификация данных ДЗЗ; 3D-моделирование рельефа.***IDENTIFYING DESERTIFIED TERRITORIES BASED ON COMPREHENSIVE ANALYSIS OF MULTISPECTRAL (LANDSAT) AND RADAR (SRTM) SATELLITE DATA****B.Z. Tsydypov, I.A. Mironov, A.I. Kulikov**Baikal Institute of Nature Management SB RAS,  
6 Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047.Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
6 Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047.

On the example of polygon-transect in the Barguzin basin (the Buryat Republic) the authors carry out a combined analysis of terrain morphometric characteristics and the results of multispectral data processing with the use of GIS methods. An automatic classification of natural environments and spatial topographic terrain modeling is provided. A comparative analysis of the results of the multispectral classification, terrain modeling, and field work is performed.

9 figures. 3 tables. 9 sources.

*Key words: multispectral classification of remote sensing data; 3D-terrain modeling.*

**Введение.** Регулярная космическая съемка представляет собой объективный материал о состоянии земной поверхности и ее изменениях, а современные геоинформационные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают точное по координатам совмещение разнообразных материалов для изучения и картографирования поверхности Земли.

Целью данной работы является совместный анализ морфометрических характеристик рельефа и результатов обработки мультиспектральных данных с использованием геоинформационных методов на примере модельной территории – полигона-трансекты в Баргузинской котловине (Республика Бурятия).

**Задачи:**

- автоматизированная классификация природных сред;
- пространственное топографическое моделирование рельефа;
- сравнительный анализ результатов мультиспектральной классификации, моделирования рельефа и полевых работ.

Использованы следующие исходные данные:

1. Мультиспектральный снимок со спутника Landsat 7 (спектрорадиометр ETM+, съемка 26.07.2002, облачность 0%).

2. Радарные снимки SRTM (съемка 2000 г.).

3. Материалы геоботанического и почвенного обследования, полученные во время полевых работ 29 мая – 1 июня 2009 г. Предварительно выбрана трансекта, на ней заложены 11 почвенных разрезов (рис. 1). Пробоотбор почв сопровождался GPS-съемкой с помощью навигатора Garmin GPS 60.

4. Топографические карты масштабов 1:25 000 и 1:100 000.

Обработка космических снимков осуществлялась при помощи программного комплекса ENVI 4.7 ([www.itvis.com/ENVI](http://www.itvis.com/ENVI)), который включает наиболее полный набор функций для обработки данных ДЗЗ и их интеграции с ГИС. ПК ENVI признан во всем мире как лидер в анализе мультиспектральных и гиперспектральных изображений. Комплекс содержит средства для выполнения спектрального и топографического анализа, классификации изображений, цифровой фототриграмметрии, картографирования в растровом, векторном форматах и т.д.

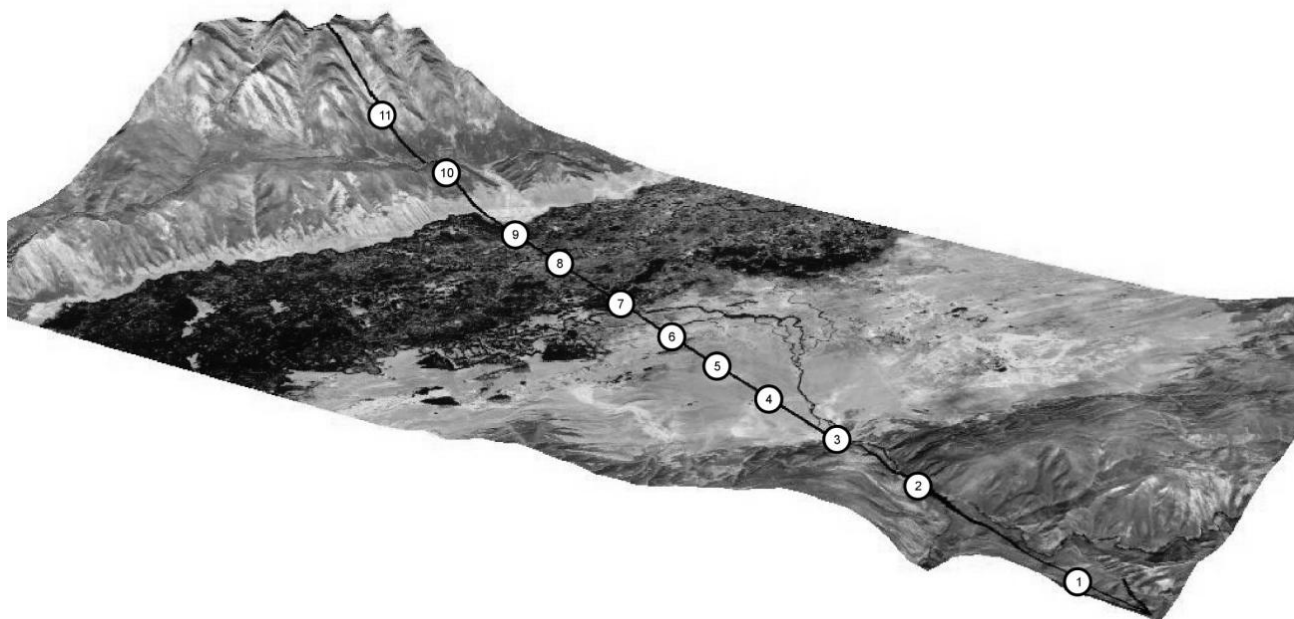
<sup>1</sup>Цыдыпов Баир Зугдырович, кандидат технических наук, ведущий инженер, тел.: 89148310068, e-mail: bz61@mail.ru  
Tsydypov Bair, Candidate of technical sciences, Remote Sensing, Leading Engineer, tel.: 89148310068, e-mail: bz61@mail.ru

<sup>2</sup>Миронов Илья Андреевич, аспирант, тел.: 89024585476.

Mironov Ilya, Postgraduate, tel.: 89024585476.

<sup>3</sup>Куликов Анатолий Иннокентьевич, доктор биологических наук, тел.: 89025648226.

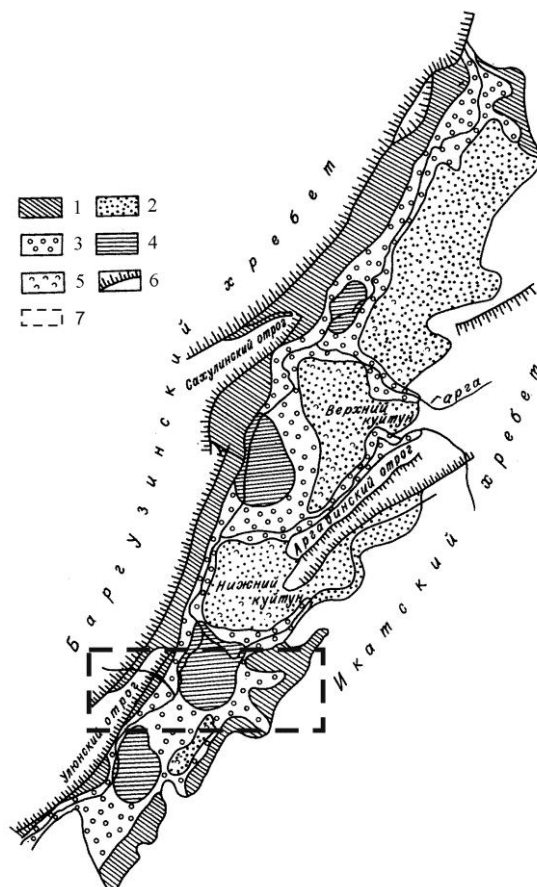
Kulikov Anatoly, Doctor of Biological Sciences, Remote Sensing, tel.: 89025648226.



**Рис. 1.** 3D-вид района исследования. В качестве текстуры – снимок Landsat ETM+. Линией показан полевой маршрут, цифрами отмечены точки пробоотбора почв

**Характеристика ключевого участка.** Евразийская аридная и засушливая субгумидная зона (ЕАСЗ) единой широкой полосой тянется от венгерских пушт на западе до Центральной Азии на востоке. ЕАСЗ является экотонным (тайга-пустыня, гумидная-экстрааридная зоны) образованием надзонального уровня. В зимний период над территорией ЕАСЗ формируется климатический феномен – азиатский антициклон, причем он в виде ветро-барического водораздела пространственно простирается вдоль ЕАСЗ, образуя так называемую климатическую ось Воейкова, и диктует циклоническую деятельность над всей Евразией. Северный форпост опустынивания находится в пределах Центральной Азии. Он пространственно неоднороден, как пространственно неоднородно распределены экологические ниши разных типов опустынивания. По радиационно облучаемым аридизированным склонам опустынивание заходит высоко в горы и далеко вклинивается в высокие широты. Спецификой северного форпоста опустынивания является его развитие при контакте с вечной мерзлотой [1].

Выбор территории исследования обусловлен ображениями географической репрезентативности, подразумевающей ландшафтно-геоморфологическое разнообразие. В центральной части Баргузинской котловины заложен экологический профиль, охватывающий северный макросклон и шлейфы Икатского хребта, днище котловины со слаборенированными субкотловинами, предгорья, склоны и водораздел противоположного Баргузинского хребта (рис. 2; также см. рис. 1). Замечательная особенность данного ключевого участка состоит в том, что при сравнительно небольших его размерах (60×25 км) в днище котловины отмечается сложное сочетание различных лесостепных, пойменно-луговых, заболоченных и солончаковых экосистем.



**Рис. 2.** Главные геоморфологические элементы Баргузинской котловины: 1 – предгорная наклонная равнина; 2 – песчаные массивы – «куйтун»; 3 – озерно-аллювиальная равнина; 4 – озерно-болотные низины зон новейшего погружения; 5 – котловины выдувания; 6 – сбросовые уступы горных хребтов; 7 – выбранный полигон



Баргузинская котловина представляет собой резко очерченное опускание земной коры (до отметки 500 м над уровнем моря) внутри Саяно-Байкальского Станового нагорья между Баргузинским и Икатским хребтами и характеризуется возвышенным и значительно расчлененным рельефом. Котловина простирается с юго-запада на северо-восток более чем на 200 км, ширина ее достигает 35 км, высота днища – от 470 до 600 м. С северо-запада она ограничена крутой сбросовой стороной Баргузинского хребта, альпинотипные вершины которого лежат на высоте 2600–2800 м, с юго-востока – пологоволнистыми склонами Икатского хребта, поверхность осевой линии которого достигает абсолютной высоты 2600 м. Центральная низкая часть котловины – болотно-луговая приречная равнина шириной до 15 км. От расположенной на юго-западе Усть-Баргузинской котловины она отделена Шаманским порогом – соединительной перемычкой между Баргузинским и Икатским хребтами [2].

**Пространственное топографическое моделирование рельефа.** В настоящее время с появлением цифровых карт и планов, увеличением быстродействия компьютерной техники, развитием методов дистанционного зондирования и фотограмметрии появляются новые возможности представления рельефа местности [3, 4].

В данной работе для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались спутниковые высотные данные международного проекта SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) под эгидой NASA. SRTM – уникальная по широте охвата земной поверхности цифровая модель рельефа земной поверхности – получена на базе радарной интерферометрии (сравнения изображений близкоразнесенных – апертура 80 м – радаров). Съемка была осуществлена в феврале 2000 г. в течение 11 дней с борта космического челнока Shuttle Endeavour. Было отснято 85% территории земного шара. Из-за особенностей орбитальных характеристик спутника для него недоступны полярные области – самые северные (больше 60° с.ш.) и самые южные широты (больше 54° ю.ш.) [5, 6].

Радиолокационная съемка рельефа SRTM предназначена для построения достаточно точной ЦМР. Так, ее среднеквадратическая погрешность по высоте равна 16 м, а позиционная точность положения узлов трехсекундной сетки составляет около 20 м. Такая точность ЦМР вполне приемлема для субрегионального пространственного анализа рельефа [7].

Высотные данные доступны в виде массива с угловым разрешением 3 секунды по долготе и широте, что для нашего региона составляет 57×90 м соответственно. В каждой клетке матрицы высот – ячейке геопривязанного раstra – хранятся сведения о средней высоте земной поверхности, свойственной данной ячейке.

После загрузки с ftp-сервера NASA высотных радарных данных и «сшивки» требуемых сцен была получена геомозаика. Все морфометрические показатели полигона получены при анализе данной ЦМР – цифровой основы для крупномасштабного морфометрического картографирования выбранной территории.

В исходной ЦМР были намечены границы полигона и выделен район исследований. Рассмотрим продольный профиль трансекты (рис. 3).

Видно, что уровень земной поверхности падает с высоты приблизительно 2400 м до 500 м над уровнем моря. В результате анализа высотных отметок трансекты было установлено, что днище котловины имеет ярко выраженную ровную поверхность с естественными границами в виде резко увеличивающейся высоты рельефа.

В качестве текстуры для наложения на полученную 3D-модель были использованы снимок Landsat ETM+ и отсканированная геопривязанная топографическая карта М 1:100 000 [8]. Трехмерная модель рельефа с наложенной на нее текстурой является более информативной, так как помимо информации о рельефе на ней достаточно подробно представлены объекты местности (рис. 4; также см. рис. 1).

С помощью функции «Отмывка рельефа» получено реалистичное изображение рельефа (рис. 5).

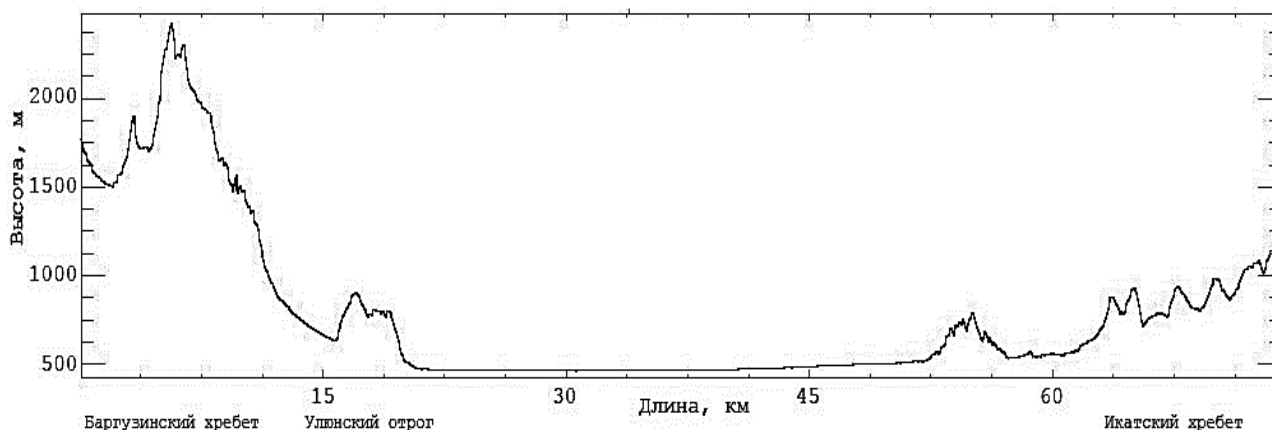


Рис. 3. Высотный профиль полевого маршрута



Рис. 4. Трехмерное представление Landsat-снимка Баргузинской котловины

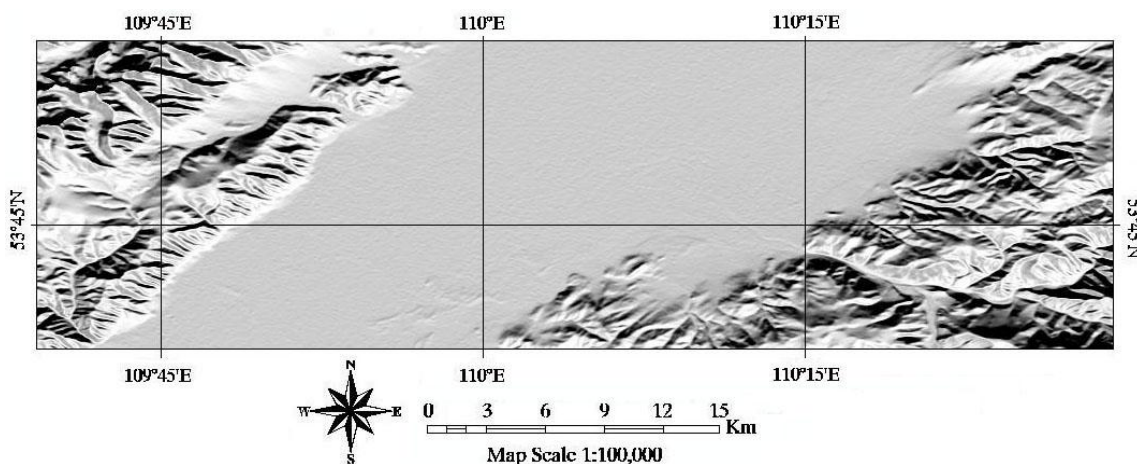


Рис. 5. Карта полигона в виде отмывки рельефа<sup>4</sup>

С целью проведения морфометрического анализа рельефа был построен и проанализирован (в совокупности с данными натурных наблюдений) ряд соответствующих морфометрических карт: гипсометрии, уклонов и экспозиции склонов земной поверхности. Для этого радарное изображение было отклассифицировано средствами топографического моделирования ENVI (табл. 1). В результате классификации установлено, что наибольшую площадь занимают участки с высотами  $466 \div 725$  м и уклонами до  $1^\circ$ , расположенные в днище котловины. На территориях прилегающих гор преобладают сильно расчлененные формы рельефа, а непосредственно в днище общий наклон поверхностей достигает  $5^\circ$ , в среднем варьируя в пределах до  $3^\circ$ . Наименьшая высота днища котловины равна 466 м, наибольшая – 530 м (рис. 6, 7). Созданная карта углов наклона (в принятой в землеустройстве градации) отображает крутизну склонов крупных форм рельефа и его протяженных элементов (склонов речных долин, уступов и др.). На ней четко различаются

поверхности и склоны различной крутизны (рис. 8).

**Дешифрирование природных сред.** Одним из конечных продуктов технологического процесса обработки данных ДЗЗ является отдешифрированный снимок. Интерпретация аэрокосмических изображений может быть подразделена на две основные категории – визуальное дешифрирование и автоматическое распознавание объектов с использованием компьютеров. Гибридный подход сочетает преимущества визуального и автоматического дешифрирования и интенсивно используется для интерпретации крупномасштабных изображений высокого разрешения.

Для дешифрирования был использован мультиспектральный снимок Landsat ETM+ от 26 июля 2002 г. Период полного летнего облиствения характеризуется стабильностью, продолжительностью и наилучшими условиями освещения. Зеленая растительность достигает своего наивысшего развития, древесной лиственных и смешанных насаждений образует плотный полог с устойчивой зеленой окраской.

<sup>4</sup> Все морфометрические карты приведены к одному масштабу.

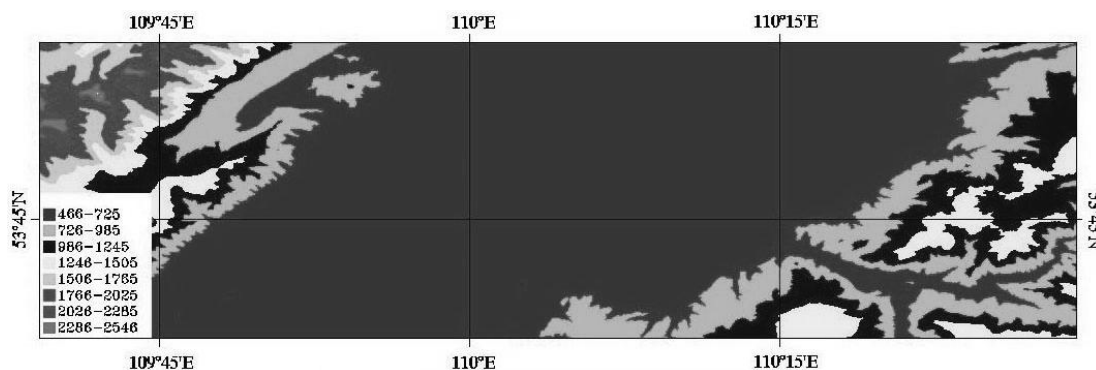


Рис. 6. Карта полигона по ступеням высоты (в метрах)

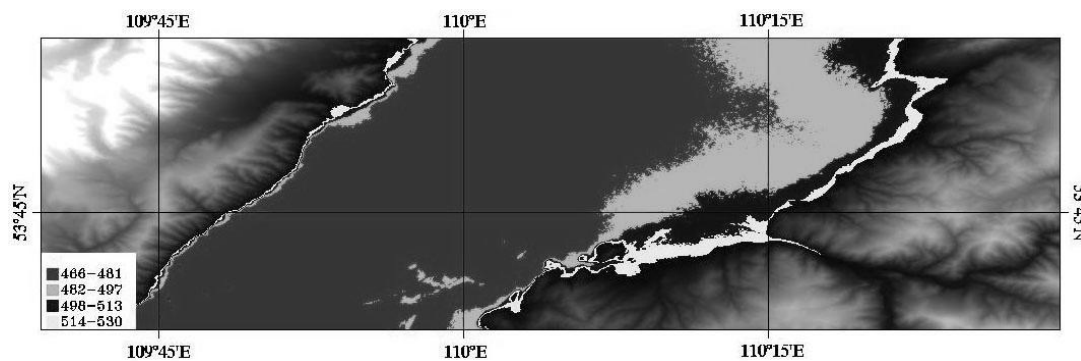


Рис. 7. Карта высот дна котловины (в метрах)

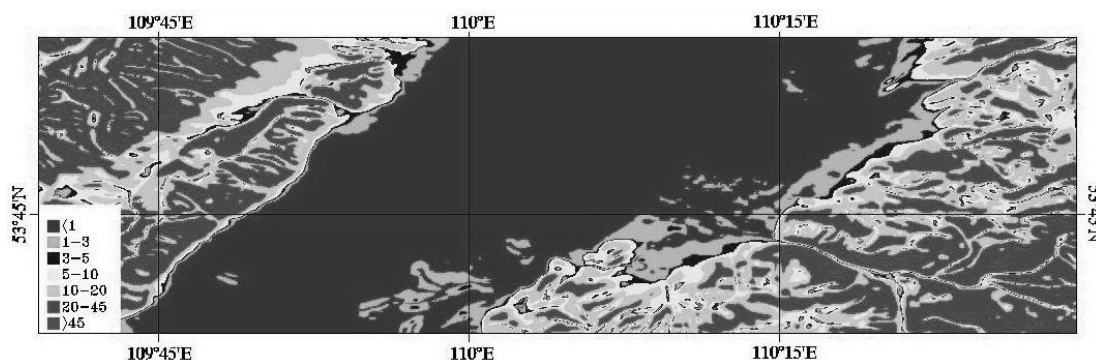


Рис. 8. Карта уклонов (в градусах)

Таблица 1

**Классификация поверхности полигона по некоторым морфометрическим показателям**

Углы уклонов, °	Площадь, га	Высота, м	Площадь, га
< 1	62545,457	466-725	91227,539
1-3	7982,900	726-985	20628,352
3-5	3,818,706	986-1245	18130,957
5-10	11744,025	1246-1505	8478,201
10-20	23228,680	1506-1765	2947,854
20-45	32448,813	1766-2025	2839,316
> 45	4405,220	2026-2285	1600,555
		2286-2546	314,404

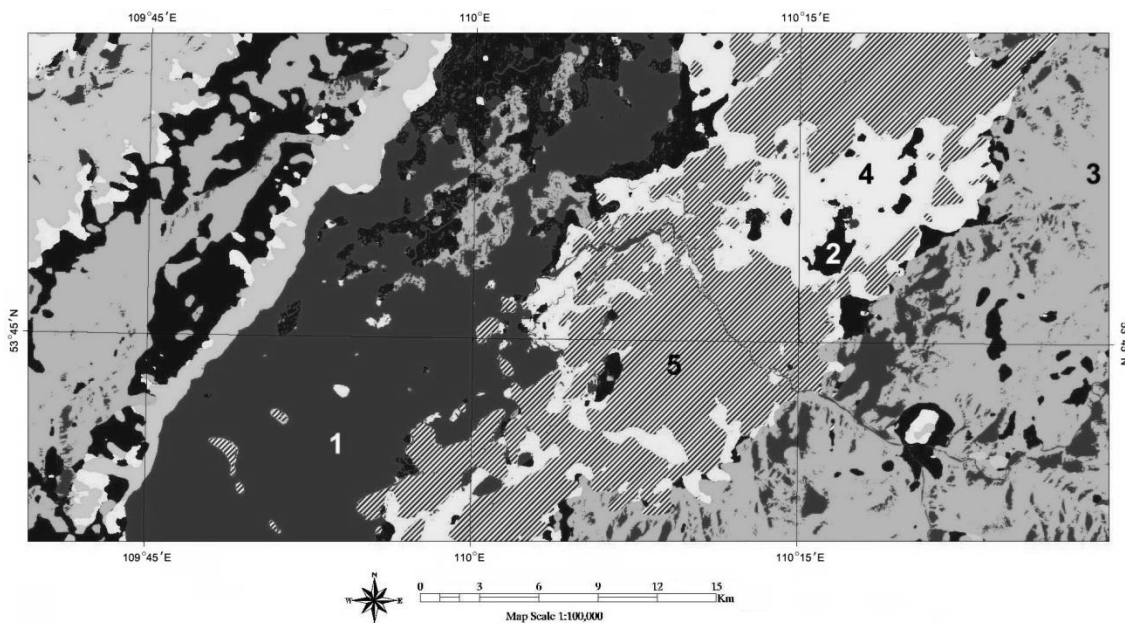
Последовательность работ по обработке изображения Landsat ETM+ следующая:

- 1) загрузка ортотрансформированного снимка с ftp-сервера Интернет-портала Национальной геофизической службы США;
- 2) преобразование снимка – синтез RGB-

композиата, покоординатное выделение нужного фрагмента;

- 3) дешифрирование объектов (классификация);
- 4) создание векторных слоев полученных классов;
- 5) получение итоговой карты опустыненных территорий.

Одно из основных направлений использования многозональных снимков – синтез цветных изображений для визуального дешифрирования и последующей автоматизированной классификации. Известно, что сущность объектов целесообразно определять по снимкам с натуральной цветопередачей, а их оконтуривание и выделение – по снимкам с преднамеренно ложной цветопередачей. Для создания псевдоцветного RGB-композиата использовалась комбинация каналов 7-4-2 – синтез данных инфракрасного канала (ИК) и зеленого видимого: R – 7 канал, G – 4 канал, B – 2 канал (табл. 2). Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам. Здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, травянистые сообщества – зелеными, ярко-розовые участки детектируют



**Рис. 9. Карта классификации (ISODATA) и последующей генерализации. Цифрами обозначены полученные классы. Штриховкой выделены опустыненные территории**

открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой. Песок, почва и минералы могут быть представлены очень большим числом цветов и оттенков. Сгоревшие территории выглядят ярко-красными. Оливково-зеленый цвет характерен для лесных массивов, а более темный цвет является индикатором примеси хвойных пород. Данная комбинация используется для изучения сельскохозяйственных земель и водно-болотных угодий, при анализе пустынь и опустыненных территорий.

**Таблица 2**

**Спектральные диапазоны (каналы) радиометра Landsat ETM+**

Номер канала	Разрешение, м	Зона	Начало, нм	Конец, нм
1	30	Синяя	450	515
2	30	Зеленая	525	605
3	30	Красная	630	690
4	30	Ближняя ИК	760	900
5	30	Средняя ИК	1550	1750
6	60	Дальняя ИК	10400	12500
7	30	Средняя ИК	2080	2350
8	15	Панхроматическая	520	900

Следующим этапом работы была сегментация снимка по типам природных сред. Цель проведения данной классификации – получение достоверных данных о подстилающей поверхности анализируемого участка котловины с выделением их в определенное

количество классов. Был использован алгоритм неконтролируемой кластеризации ISODATA (Iterative Self Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующая методика анализа данных). Данный алгоритм целесообразно применять при отсутствии априорной информации об объекте съемки. Метод позволяет выделять контуры с неконтрастной по спектральной яркости структурой, например, растительность, открытые почвы и т.д. После долгого подбора входных значений были выбраны оптимальные, на наш взгляд, параметры: количество классов – 5, максимальное число итераций – 20, порог сходимости – количество пикселей, которые меняют свою принадлежность к классу при переходе к следующей итерации, – 5 %, максимальное стандартное отклонение от среднего – 13, минимальное число пикселей для выделения класса – 3, максимальное стандартное отклонение внутри класса – 5, минимальное спектральное расстояние – 5 пикселей.

Также для выделения опустыненных территорий на космическом снимке использовалась контролируемая (иначе – с обучением) классификация методом минимального спектрального расстояния. Для создания обучающих выборок (областей интересов – ROIs) задавалось 5 типов эталонных участков: водные поверхности, леса, луга, степь и участки, практически лишенные растительности. Участки обучающих выборок выбирали с использованием топографических карт, материалов полевых наблюдений и визуального дешифрирования снимков. Для каждого типа эталонов подсчитывались среднее значение яркости пиксела и стандартное отклонение яркости. Максимальное стандартное отклонение от среднего значения яркости класса «опустыненные участки» не превышало значения 2, что связано с достаточно близкими значениями яркости пикселей в этом классе.

После проведения неконтролируемой классификации полученная карта классификации более объек-



Таблица 3

**Результаты классификации по типам подстилающей поверхности**

Класс	Цвет	Тип подстилающей поверхности	Площадь, га	Площадь, %
1		Водно-болотный	34633,7	24,7
2		Галогеохимический	19023,9	13,5
3		Таежно-лесной	35410,1	25,1
4		Степной	15570,2	11,1
5		Участки, лишённые растительности	36047,3	25,6
Всего			140685,2	100

тивно отражает близкие по значениям дешифровочных признаков группы объектов, чем при контролируемой классификации, так как кластеры определяются автоматически. Однако полученная карта классификации требует дальнейшего объединения или разбиения классов, поскольку одни и те же объекты могут попасть в разные кластеры (например, из-за условий освещения), а разные объекты – оказаться в одном кластере (из-за одинаковой яркости). В первом случае необходимо объединить кластеры в единый класс, а во втором – привлечь дополнительные дешифровочные признаки для различения объектов.

Результаты неконтролируемой и контролируемой классификаций оказались похожими. Так, опустыненные ареалы на двух полученных изображениях оказались почти идентичными; это связано с тем, что они (ареалы) достаточно однородны по спектральной яркости. Недостатком выделения является частичное перекрытие яркостных характеристик полученных участков со скальными породами, но при дальнейшей обработке эти наложения были легко удалены.

Дальнейший этап в дешифрировании природных сред – постклассификационная обработка. Она проводилась методом Majority Analysis (анализ большинства). Цель этого метода фильтрации изображения – усилить воспроизведение распознанных объектов, подавить шум и другие случайные помехи, другими словами – генерализация изображения. В процессе обработки происходит изменение размера каждого пиксела изображения в зависимости от значений соседних пикселей в скользящем окне размерами 9×9 пикселей [9]. Результат постклассификации представлен на рис. 9 и в табл. 3.

Отметим, что обрабатываемый снимок конца июля, а это период активной вегетации растительности, но налицо большое количество опустыненных территорий (класс 5) – 36 тыс. га, это 25% от выбранной территории (табл. 3).

С привлечением данных геоботанических и почвенных исследований была произведена чистка векторных слоев и конечный результат векторного слоя опустыненных территорий в виде заштрихованных полигонов представлен на рис. 9. Получена площадь нарушенных территорий – приблизительно 20 тыс. га.

**Заключение.** В работе были задействованы данные ДЗЗ в качестве информации об окружающей природной среде и степени ее нарушенности. Использовался мультиспектральный снимок Landsat ETM+ с пространственным разрешением 30 м. Этого разрешения вполне достаточно для крупномасштабного тематического картографирования в масштабе 1:100 000. Проведенное автоматизированное дешифрирование методами контролируемой и неконтролируемой классификации позволило получить площадные характеристики классов, выявить и оконтурить опустыненные территории. Применение автоматизации в распознавании объектов на порядок ускоряет процесс дешифрирования снимков и дает разнообразные варианты работы с полученными данными: анализ, векторизация, группировка и т.д. Несомненно, функция автоматической классификации является важным шагом на пути снимок – карта – ГИС.

Отработанная методика дешифрирования космоснимков позволит в дальнейшем распространить приобретенные знания и опыт на другие территории.

Проведенный морфометрический анализ рельефа позволил получить количественную оценку параметров рельефа. Набор морфометрических показателей дает возможность оценить экологическое состояние и сельскохозяйственный потенциал Баргузинской котловины.

**Библиографический список**

1. Пространственно-временная динамика свойств почв Байкальского региона в связи с опустыниванием / А.И.Куликов [и др.] // Почвоведение. 2004. № 6. С. 654–662.
2. Почвы Баргузинской котловины / Т.И.Азьмука [и др.]. Новосибирск: Наука, 1983. 269 с.
3. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modeling – a review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrol. Proc. 1991. N 5. P. 3–30.
4. Pike R.J. Geomorphometry – progress, practice, and prospect // J. Geomorph. Suppl. 1995. Vol. 101. P. 221–238.
5. Farr T.G., Hensley S., Rodriguez E., Martin J., Kobrick M. The Shuttle Radar Topography Mission // CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 Oct. 1999, Noordwijk. 2000. P. 361–363.
6. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E. et al. An assessment of the SRTM Topographic Products, Jet Propulsion Laboratory D-31639. California Institute of Technology. 2004. 146 p.
7. Антипцева Ю.О., Дулит Ж.А. Морфометрический анализ рельефа с использованием ГИС-технологий при оценке рекреационного потенциала Лагонакского нагорья (Северо-Западный Кавказ) // Геоморфология. 2009. № 1. С. 45–50.
8. Цыдыпов Б.З. Создание трехмерных моделей местности по спутниковым радарным высотным данным SRTM // Современные тенденции развития земледелия и защиты почв: мат. междунар. научно-практ. конф. Улан-Удэ, 2009. С. 160–166.
9. Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Андреев С.Г. Динамика изменения береговой линии оз. Байкал по разновременным космическим снимкам Landsat (на примере дельты р. Селенги) // Дельты Евразии: происхождение, эволюция, экология и хозяйственное освоение: мат. междунар. научн. конф. Улан-Удэ, 2010. С. 103–110.