

Разработка и составление базы геоданных для картографирования и моделирования наземных экосистем средствами ГИС и ДЗ на примере Чуйской степи Горного Алтая

И. Д. ЗОЛЬНИКОВ*, А. Ю. КОРОЛЮК**, Е. Н. СМОЛЕНЦЕВА***, В. А. ЛЯМИНА*,
Н. Н. ДОБРЕЦОВ *, У. В. МАРТЫСЕВИЧ*

* *Институт геологии и минералогии СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3*

** *Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101
E-mail: akorolyuk@rambler.ru*

*** *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18*

АННОТАЦИЯ

Разработана система комплексного многопараметрического описания ландшафтов микро- и мезо-иерархического уровней. По результатам полевых описаний, проведенных по этой системе в Чуйской степи, создана база геоданных, содержащая качественные и количественные характеристики наземных экосистем Чуйской степи и их основных компонентов (рельеф, породы, почвы, растительность). Апробирована технология автоматизации подсчета удельного площадного соотношения абиотических и биотических составляющих микроландшафта по цифровым фотографиям эталонных площадок. С использованием треугольных диаграмм проанализирован компонентный состав мезоландшафтов. Полученные результаты могут быть использованы для дешифрирования и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли, а также при картографировании и моделировании геосистем на локальном и региональном уровнях.

Ключевые слова: базы геоданных, данные дистанционного зондирования, геоинформационное моделирование, наземные экосистемы.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) из космоса активно используются для картографирования и мониторинга наземных экосистем. Это не удивительно, поскольку именно геосистемы являются теми

объектами, которые относительно легко читаются на космических снимках (по сравнению, например, с геологическими образованиями). Однако при автоматическом дешифрировании ДДЗЗ с использованием управляемых и неуправляемых классификаций, индексов и других методов обработки изображений нередко возникает ряд затруднений. Одна из основных проблем, встающих перед интерпретатором мультиспектральных снимков, связана с необходимостью оценки вкла-

Зольников Иван Дмитриевич
Королюк Андрей Юрьевич
Смоленцева Елена Николаевна
Добрецов Николай Николаевич
Лямина Виктория Александровна
Мартысевич Ульяна Васильевна

да различных абиотических и биотических компонентов в интегральный спектральный отклик ландшафта. Не менее актуальной проблемой является гетерогенность значительной части наземных экосистем. Сложнопостроенные ландшафты формируют на изображениях смесь спектральных откликов различной яркости, что не позволяет решать задачу стандартными методиками разграничения анализируемой площади по классам однородных полей, представленных пикселями с однотипными спектрами. Перечисленные затруднения часто приводят к тому, что картографирование геосистем ранга урочище – местность [1] проводится вручную путем векторной оцифровки по растровым подложкам – цифровым моделям рельефа (ЦМР) и космоснимкам. Ручная оцифровка вносит значительную долю субъективности в картографические материалы, создаваемые на основе ДДЗЗ. Этим определяется актуальность исследований, ориентированных на создание технологий анализа вклада различных компонентов гетерогенных ландшафтов (рельеф, геологическое строение и состав, гидрологические особенности, почвы, растительность и др.) в яркостные характеристики мультиспектральных космических снимков.

Одна из основных задач междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 56 – разработка методики создания геоинформационных моделей наземных экосистем с приоритетным учетом признаков, вносящих вклад в формирование спектрального отклика элементарных геосистем (фаций), фиксируемых на ДДЗЗ. В качестве полигона для отработки методик выбрана Чуйская степь в Горном Алтае, поскольку она расположена в межгорной впадине и является автономной в ландшафтном аспекте территорией, ограниченной горными хребтами, массивами и плато, имеет конечный и вместе с тем довольно разнообразный набор геосистем. Кроме того, исключение из геоинформационного анализа горного обрамления Чуйской степи позволило снизить эффект влияния угла наклона и экспозиции склонов на отраженный от земной поверхности сигнал в связи со слабой расчлененностью рельефа.

Таким образом, наши исследования ориентированы на создание технологий учета вклада различных компонентов наземных экосис-

тем (рельефа, геологического строения и состава пород, почв, растительности) в яркостные характеристики мультиспектральных космических снимков, а также на формализацию методик объединения элементарных геосистем в объекты более высокого ранга. Разработка баз геоданных представляет собой один из этапов технологической последовательности создания геоинформационных моделей гетерогенных ландшафтов, отвечающих по иерархии среднему масштабу картографирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Анализ проведен на двух иерархических уровнях геосистем: микро- и мезоландшафтов. При проведении наземных исследований основным объектом и таксономической единицей является элементарный микроландшафт (фация), который отражается однотипным спектральным откликом на ДДЗЗ. Элементарный микроландшафт имеет внешние и внутренние свойства. Внешние свойства отражаются в таких признаках, как: геопривязка, размер, форма, ориентировка в пространстве (для неизометричных объектов), характер взаимоотношения со смежными микроландшафтами. Внутренние свойства отражаются в признаках, характеризующих основные компоненты микроландшафта: рельеф, коренные породы, рыхлые отложения, почвы, растительность. Первичная атрибутивная база данных описывает как внутренние, так и внешние свойства элементарных микроландшафтов, которые, различным образом комбинируясь в пространстве, образуют типовые мезоландшафты (урочища и местности) Чуйской степи.

Для проведения наземных исследований и сбора данных с учетом вышеназванных свойств микроландшафта разработана система многопараметрического комплексного описания ландшафта. Используемое ранее междисциплинарное описание [2], составленное путем простого объединения результатов геолого-геоморфологических, почвенных, ботанических наблюдений, оказалось не вполне пригодным для геоинформационного моделирования ландшафтов в связи со слишком узкой специализацией количественных харак-

теристик и преобладанием качественных, в основном текстовых комментариев. Требовалось выбрать параметры, наиболее существенные для качественной характеристики компонентов и одновременно значимые для формирования спектральных кривых яркости. Поэтому проведена унификация стандарта описания, в результате чего подобран и утвержден набор индивидуально-индикационных, количественных и полуколичественных признаков, характеризующих типовые ландшафтные обстановки, иерархически отвечающие уровню среднemasштабных карт и схем (1 : 100 000 – 1 : 300 000), а также снимкам с пространственным разрешением от 10–60 м. Эта унификация проводилась в виде многоитерационных последовательных приближений на протяжении нескольких полевых и камеральных сезонов на разных полигонах юга Западной Сибири [3].

Стандарты многопараметрического комплексного описания базовых составляющих микро- и мезоландшафтов (геолого-геоморфологического строения, почв и растительности) разрабатывались совместно сотрудниками лаборатории геоинформационных технологий и дистанционного зондирования ИГМ СО РАН, ЦСБС СО РАН, ИПА СО РАН. Непосредственно в поле по этим стандартам сделаны конкретные тематические описания по точкам и полигонам, а в камеральный период созданы базы геоданных. Приведем пример комплексного описания мезоландшафта.

Шифр: Ch_L_001

Макрорельеф: денудационно-останцовый массив палеозойских пород

Геопривязка: координаты середины полигона
N = 49,83284

E = 88,74661

H = 1924 м

Мезорельеф: делювиальный шлейф

Количество элементарных ландшафтов, составляющих полигон: 3

Текстурный тип полигона: пятнистый

Мезоландшафт: несомкнутые группировки растительности на криоаридных почвах на делювиальных шлейфах

Примечание по снимку: на снимке Landsat фиксируется в виде слабонеоднородного шлейфового обрамления скального останца

1 КОМПОНЕНТ: Ch_L_001_1

Микроландшафт: ковыльно-чиевая сухая степь на криоаридной эолово-аккумулятивной супесчаной почве на делювиальном шлейфе

Удельная площадь микроландшафта: 5 %

Форма: округлые пятна 10–12 м в диаметре

Растительность: 20 %

Тип растительности: ковыльно-чиевая сухая степь

Описание растительности: 7–170

Доминанты растительности: чий (*Achnatherum splendens*), ковыль Крылова (*Stipa krylovii*)

Лишайник: 0 %

Ветошь: 0%

Генетический тип: делювий

Литотип: суглинок легкий пылевато-песчаный с дресвой и редким щебнем, покрытый надувом супеси 10 см толщиной.

Почва: криоаридная эолово-аккумулятивная супесчаная

Почва: 60 %

Гранулометрический состав почвы: супесь песчаная

Каменистость: 20 %

Состав грубозема: дресва

Коренные: 0 %

Состав коренных: отсутствуют

Примечание по снимку: наиболее темные контуры на снимке Quickbird.

2 КОМПОНЕНТ: Ch_L_001_2

Микроландшафт: несомкнутые группировки растительности на криоаридной эолово-аккумулятивной песчаной почве делювиального шлейфа, составляющие...

Удельная площадь микроландшафта: 30 %

... (подробности дальнейшего описания опущены)

3 КОМПОНЕНТ: Ch_L_001_3

(текст описания микроландшафта)

Микроландшафт: аналог Ch_L_001_2, биотурбированный колониями пищух

Удельная площадь микроландшафта: 65 %

... (подробности дальнейшего описания опущены)

Многопараметрическая характеристика микроландшафтов, полученная при проведении наземных исследований в полевой период и сгруппированная по представленной схеме, является одновременно атрибутивной (семантической) составляющей базы геоданных,

которая содержит информацию для последующего обобщения и формирования характеристик и названий геосистем более высоких иерархических уровней. Всего проведено описание 78 элементарных микроландшафтов (фаций), часть из которых представляет собой компоненты гетерогенных геосистем более высокого ранга (урочищ и местностей). В тех случаях, когда ландшафтный выдел представлен одним микроландшафтом, мы имеем дело с гомогенной геосистемой. Гетерогенные ландшафты изученной территории представлены обычно двух- или трехкомпонентными системами. Эталонные участки для комплексного описания в поле выбирались с учетом пространственного разрешения ДДЗЗ. Для космоснимков LANDSAT величина пикселя в каналах, используемых для исследования ландшафтов, составляет 15 и 30 м. Желательно, чтобы минимальное число пикселей, характеризующих однородный выдел, на изображении было равно 9. Тогда минимальный размер эталонного участка должен составлять не менее 90 м в поперечнике.

Отдельные компоненты ландшафта (растительность, почва, геологический субстрат, рельеф) характеризовались в поле по стандартным методикам. Диагностика почв проведена по строению профиля с использованием системы диагностических горизонтов. Названия почв даны в соответствии с новой классификацией почв России [4], что позволило более адекватно отразить особенности почвообразования в ландшафте. В камеральный период проводилась дальнейшая обработка всех комплексных полевых описаний. Уточнялись названия почв и фитоценозов, базы данных дополнялись результатами лабораторных анализов (например, данными анализа гранулометрического состава почв и пород). В результате этого сформировано окончательное семантическое описание объектов. На основе скорректированных описаний получена база геоданных, которая в дальнейшем анализировалась средствами программного пакета ArcGIS.

ХАРАКТЕРИСТИКА И АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ ГЕОСИСТЕМ

Вопросы описания тесно связаны с проблемами классификации ландшафтов, которым посвящено множество публикаций, и

простое их перечисление могло бы занять весь объем статьи. В своей работе для выделения таксономических единиц мы использовали представление об элементарных гомогенных и разнокачественных ареалах [5] применительно к определенному иерархическому уровню геосистем. Последний момент важен в силу того, что часто при геоэкологических исследованиях упускается тот факт, что космоснимок по пространственному разрешению, как правило, соответствует какому-то одному иерархическому уровню природных объектов, а смежные уровни иерархии остаются за кадром анализа ДДЗЗ.

Современные технологии позволяют учитывать вклад компонентов геосистем на самом низком иерархическом уровне. Однако применение методики полевых описаний гетерогенных микроландшафтов *in situ* затруднено, поскольку требует одновременного участия специалистов из разных предметных областей или последовательного проведения тематических описаний. С учетом задач последующей обработки ДЗЗЗ и с учетом того, что в первую очередь необходимы характеристики геосистем, которые могут быть спроектированы в пространство признаков многоспектрального снимка, необходима упрощенная и формализованная схема создания самих описаний. Поэтому в дополнение к полевым описаниям нами реализована технология автоматизации подсчета удельного вклада абиотических и биотических компонент микроландшафта по цифровым фотографиям эталонных площадок. Рассмотрим эту технологию более детально.

При разработке полевого комплексного описания ландшафта выделены ключевые параметры, ответственные за формирование спектрального отклика, разработаны шкалы порядка и процентные показатели. В качестве основных параметров для характеристики поверхности микроландшафта использовали следующие показатели, %:

1. Покрытие зеленой и сухой растительностью (ветошью).
2. Покрытие камнями (обломки крупнее 1 мм).
3. Доля открытой почвы.

Использование этой технологии позволило перейти от качественных характеристик элементарных геосистем к полуколичественным и количественным, а также создать предпосылки использования первичных дан-

ных для выявления статистических закономерностей и оценки вклада различных компонентов в формирование разнотипных спектральных кривых.

Наряду с комплексным описанием для микроландшафта делалась цифровая фотография поверхности в виде площадки (квадрата) со стороной 1 м. Затем изображение геокодировалось по углам квадрата; таким образом реализовывался переход от встроенной пиксельной системы координат растра в сантиметры. Определение вклада каждой характеристики поверхности микроландшафта проводилось через определение занимаемой площади. Для каждой фотографии геокодированный растр сначала классифицировался в программном пакете ENVI, после чего результаты переводились в векторную форму и расчет площадей классов проводился в программном пакете ArcGis. Автоматический подсчет проводился в качестве проверки наиболее проблемных ситуаций для 26 фотографий эталонных полигонов из 78.

Способ классификации полученных растровых изображений зависел от типов объектов и их количества. При первичной визуаль-

ной оценке все имеющиеся изображения разбиты на три группы:

1. Простые изображения, на которых присутствуют только однотонные объекты (почва и растительность).

2. Изображения, на которых кроме однотонных объектов (растительности и почвы) присутствуют пестроокрашенные, такие как крупнообломочный материал.

3. Нестандартные изображения (солончак, торфяник и т. п.).

Первая группа разбита на две подгруппы: с растительностью без почвы, с растительностью и почвой. Вторая группа поделена на изображения с крупным и мелким обломочным материалом.

В зависимости от принадлежности изображения к группе используется разная технология классификации снимка (рис. 1). Площадки с растительностью и ветошью наиболее просты для анализа. В этом случае обычно достаточно методов неуправляемой классификации типа ISODATA или K-means. Однако в некоторых ситуациях, при наличии нескольких доминирующих видов, отличающихся по текстурным и спектральным при-

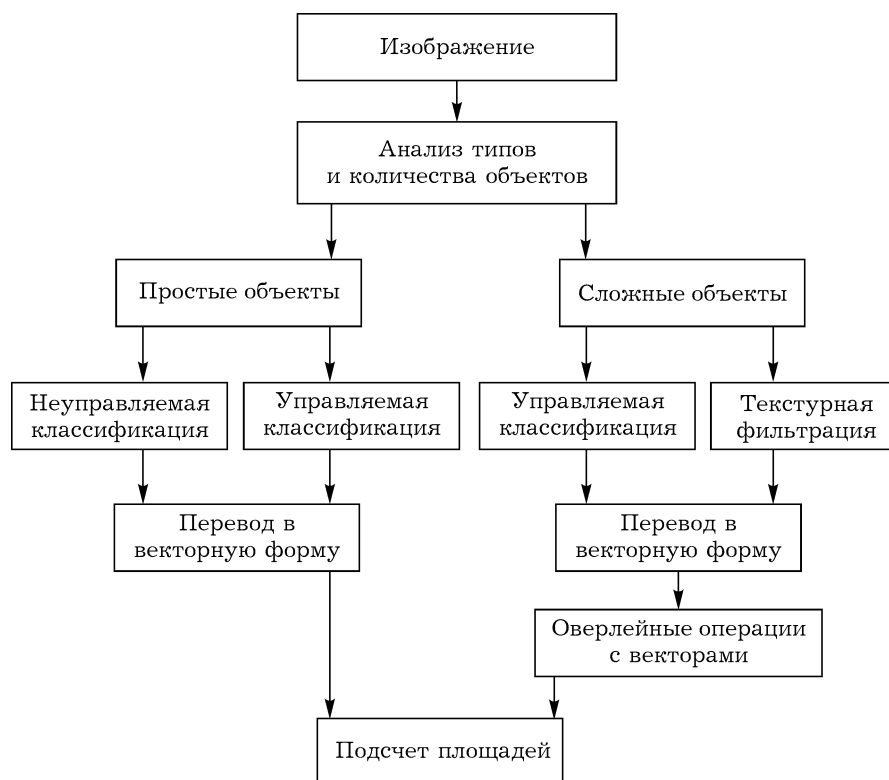


Рис. 1. Технологическая схема расчета площади объектов на изображениях

знакам, применяется управляемая классификация с выбором эталонных полигонов. При классификации изображений первой группы второй подгруппы применяется в основном управляемая классификация, однако эталонных полигонов в этом случае может быть значительно больше двух, в зависимости от наличия нескольких доминантов и типов почв.

Классификация изображений второй группы наиболее сложна, так как обломочный материал имеет различную расцветку и при проведении управляемой или неуправляемой классификации относится к разным классам. Для выделения крупных обломков проводится текстурная фильтрация изображения. При этом оценивается изменение характеристик изображения в ближайших пикселях. Это позволяет отчетливо выделить крупные обломки. При наличии на изображении множества мелких обломков эта процедура работает хуже, поскольку вместе с камнями зачастую выделяется также часть почвы и растительности. В этом случае к каждому изображению требуется индивидуальный подход. При наличии множества мелких обломков и схожести их цвета с почвой не всегда возможно отделить их от почвы. Растительность чаще всего можно отделить методом текстурной фильтрации (выделение линейных объектов), поскольку в случае степных сообществ доминируют узколистные злаки. Для вычисления площадей результаты управляемой классификации и текстурной фильтрации переводятся в векторную форму. В программном пакете ArcGis производятся оверлейные операции, позволяющие исключить крупные обломки из классов, полученных управляемой классификацией, после этого вычисляются площади объектов. Изображения, отнесенные к третьей группе, представлены единичными экзemplярами, поэтому при классификации требуют индивидуального подхода.

Выбор методов классификации зависит от характера изображения. Использование неуправляемой классификации целесообразно, когда на фотографии присутствует небольшое количество классов (2–3), четко различающихся по яркостным характеристикам. В программном пакете ENVI представлены два метода неуправляемой классификации: ISODATA и K-means. ISODATA основан на кластерном анализе. К одному классу относятся пиксе-

ли, значения яркости которых наиболее близки в пространстве спектральных признаков. Метод ISODATA позволяет задавать минимальное и максимальное количество желаемых классов. Метод K-means отличается от ISODATA тем, что требует задания конкретного числа классов, если при этом в методе K-means задать меньшее число классов, чем выделяется при классификации методом ISODATA, то получается частичное перекрытие объектов в классах. Поэтому наиболее целесообразным при проведении неуправляемой классификации следует признать использование метода ISODATA с заданием минимального числа классов, равного количеству четко различаемых объектов на снимке, а максимальное количество классов на 2 больше. Это позволяет достичь наиболее точного результата и не получить множество классов, относящихся к одному объекту. В том случае, если на снимке присутствуют сухие растения и ветошь, зеленая растительность и почва, задается минимальное количество классов 3, максимальное – 5. При этом выделяется 4–5 классов, из которых один представляет сухие растения, второй – живые, а остальные – почву.

Для фотографий, на которых представлено более трех классов, либо классы обладают незначительным различием яркостных характеристик, оптимален метод классификации с обучением, основанный на использовании эталонных полигонов. Для выбора метода классификации необходима оценка характера распределения значений яркости выбранных эталонных участков на снимке (по гистограмме распределения значений яркости пикселей) и в пространстве спектральных признаков (рис. 2). Согласно эмпирическому правилу, каждый эталонный участок должен содержать как минимум 30 пикселей. Для проведения достоверной классификации необходимо правильно подобрать метод, при этом учитываются следующие моменты. Метод параллелепипедов применяют в случае, когда области значения яркости объектов не пересекаются. Метод минимального расстояния следует использовать тогда, когда области значения яркости объектов имеют круглую форму и не пересекаются. Можно также использовать способ дистанции Махаланобиса, который отличается от способа ми-

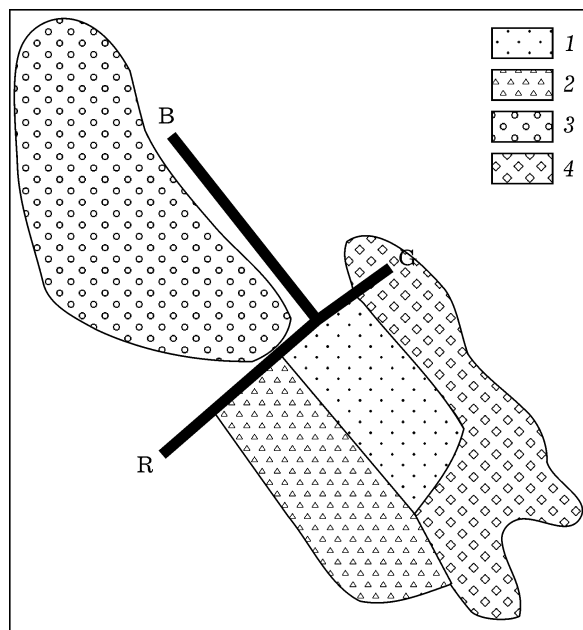


Рис. 2. Распределение значений яркости выбранных эталонных участков в трехмерном пространстве признаков (RGB). Обособленные классы: 1 – обломки; 2 – почва; 3 – ветошь (сухая растительность); 4 – зеленая растительность

нимального расстояния тем, что в процессе классификации измеряется не эвклидово, а расстояние Махаланобиса. Это означает, что этот способ учитывает распределение (дисперсию) значений яркости пикселей в эталонных участках. Способ максимального правдоподобия применяют в особенно сложных случаях, когда области значений яркости разных классов в пространстве признаков перекрываются и имеют сложную (или вытянутую) форму. Метод спектрального угла сравнивает вектор спектральных характеристик каждого пикселя изображения с векторами эталонных выборок, взятых из спектральных библиотек или из других источников. При использовании метода спектрального угла задается максимально допустимый спектральный угол. Если угол между эталонным вектором и вектором классифицируемого пикселя меньше максимального, то пиксель относится к данному классу, если больше – не относится. Этот метод удобен, если необходимо отделить один объект от всех остальных, для него необходим правильный подбор спектрального угла, иначе не все пиксели изображения будут выделены, либо будут выделены лишние пиксели.

Таким образом, выбор метода классификации зависит от типов и количества объектов (для простых изображений подходят методы неуправляемой классификации), а также от распределения яркостных характеристик пикселей в пространстве спектральных признаков (при выборе метода управляемой классификации). Особенность данной технологии заключается в том, что заранее известно количество классов, и задача состоит только в автоматическом их выделении. Это позволяет визуально оценить адекватность результата классификации и полученному расчету площадей распространения классов.

Погрешности при автоматическом подсчете удельного вклада абиотических и биотических компонентов микроландшафта по цифровым фотографиям эталонных площадок варьируют в диапазоне 2–5 %. В особенно сложных случаях эта погрешность может достигать 10 %. При классификации изображений первой группы достигается хорошее соответствие полученной классификации и исходного изображения, поэтому погрешность расчета площадей классов в данном случае невелика (1–2 %). При классификации изображений второй группы возникают погрешности, связанные с различной расцветкой обломочного материала. Так, небольшие обломки белого цвета относят часто к классу ветоши, а коричневого – к почве. Погрешности метода вычислялись посредством визуальной проверки выборочных изображений. Для таких случаев погрешности автоматизированного подсчета доли различных компонент в среднем составляют 5 %.

Результаты автоматического подсчета сравнивались с результатами полевого визуального определения. На рис. 3, а видно, что расхождения в определениях для содержания крупных обломков в среднем не превышают 10 %. Отдельные ошибки в диапазоне от 20 до 50 % составляют менее четверти от всей выборки фотографий и четко отделяются от фоновой группы значений. Фоновые расхождения в определении растительности, показанные на рис. 3, б, группируются в диапазоне от 0 до 20 % с небольшим количеством значений в интервале 25–30 %. Фоновые расхождения в определении процентного содержания почвы, показанные на рис. 3, в,

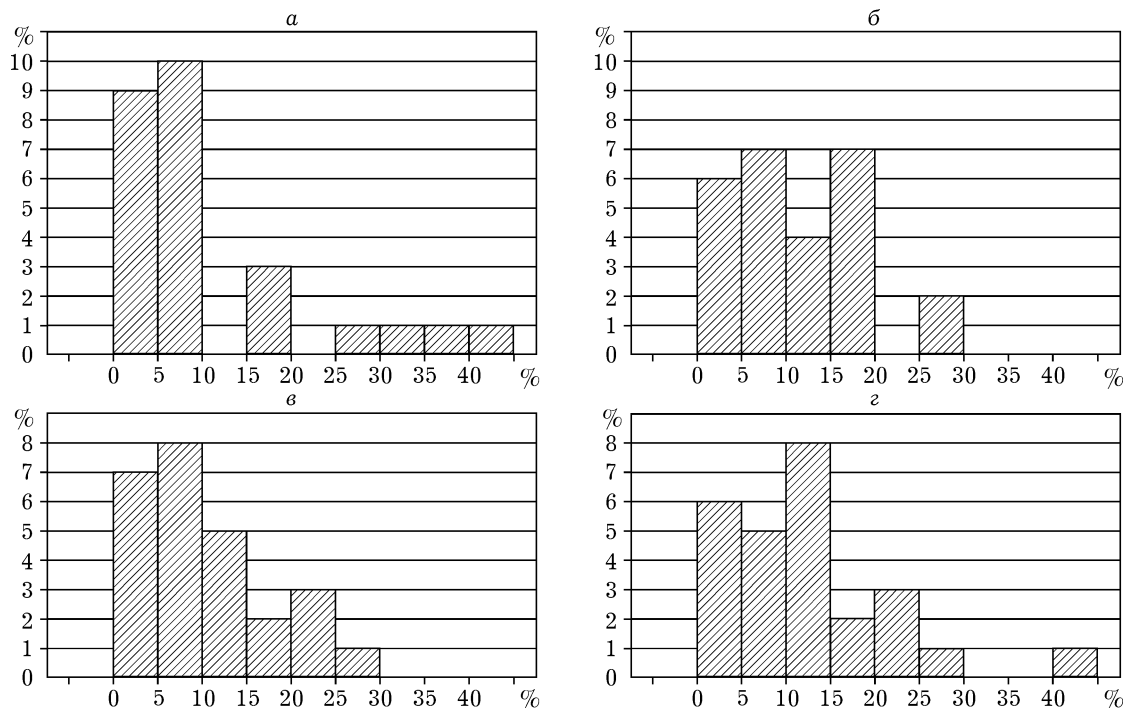


Рис. 3. Гистограммы распределения расхождений в определении удельной площади: а – крупных обломков, б – зеленой растительности, в – почвы, г – ветоши при визуальном и автоматическом определениях

группируются в диапазоне от 0 до 15 % с небольшим “хвостом” в интервале 15–25 %. Увеличение фоновых расхождений в определении растительности по сравнению с определениями “каменности” почти в 2 раза, а по сравнению с почвой – в 1,5 объясняется тем, что при полевых описаниях почти не учитывалась доля ветоши. Собственно диапазон расхождений по определению содержания ветоши, показанный на рис. 3, г, совпадает с собственно диапазоном непосредственно ее значений содержания. Поэтому нередко ветошь частично определялась в класс растительности, а частично учитывалась в составе почвы. Аномальные расхождения обусловлены тем, что при автоматизированном подсчете использовались фотографии участков со стороной 1 м, а при визуальном определении анализировались участки, достигающие в поперечнике 100 м и более. Поэтому визуальные определения являются более генерализованными. Учесть эту ошибку можно путем фотографирования двух и более эталонных участков, а результаты последующей обработки усреднить. Кроме того, подсчет по фотографиям проведен только для трети от общего числа охарактеризо-

ванных участков, при этом выбирались ситуации, наиболее проблемные для верификации. Фоновая погрешность для большинства определений варьирует в пределах 5–10 %. Проведенный анализ учтен при составлении баз геоданных.

В целом, результаты проверки формализованных описаний, составленные по результатам непосредственных полевых наблюдений и автоматизированной обработки снимков эталонных участков, близки, и погрешность определений не выходит за пределы допустимого. Можно с уверенностью предположить, что автоматизированная обработка снимков приемлема для упрощенной методики сбора и первичной обработки информации о типах поверхности и вкладе различных компонент в структуру микроландшафтов. Поскольку фотографирование эталонных участков не представляет сегодня больших трудностей и не требует привлечения специалистов-предметников, данная методика представляется сравнительно простой в использовании. Принципиальной является также возможность обработки снимков в камеральных условиях.

На основании анализа характеристик микроландшафтов проведена типизация послед-

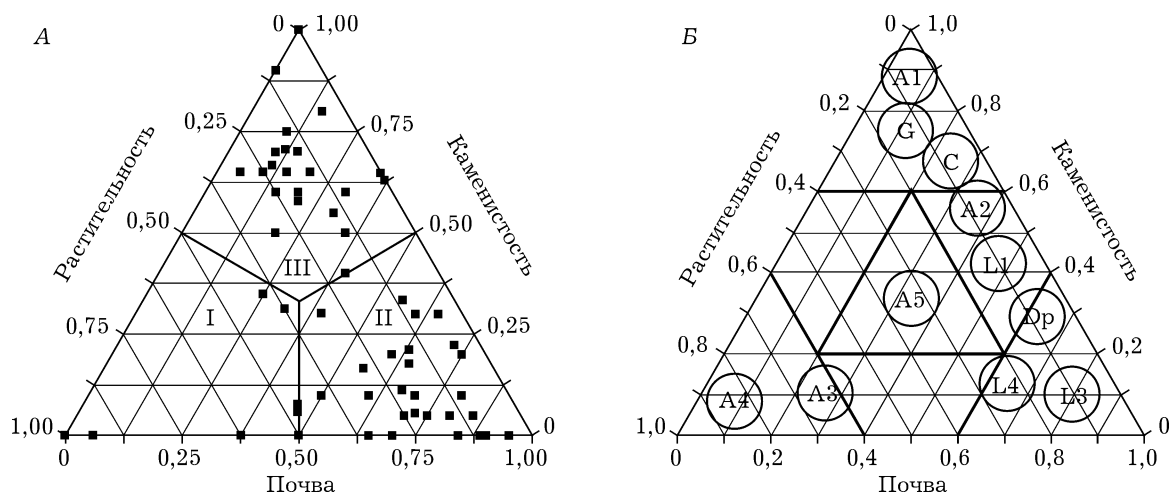


Рис. 4. Распределение микроландшафтов на треугольной диаграмме в пространстве признаков, характеризующих свойства поверхности: А – по удельному содержанию растительности, крупных обломков, почвы. Группы микроландшафтов: I – растительная; II – почвенная; III – каменная; Б – по соотношению групп микроландшафтов. Типы мезоландшафтов: С – элювиально-коллювиальный; Dp – делювиально-пролювиальный; G – гляциальный; L1 – лимнокомплекс на суглинистом основании; L2 – автоморфный лимнокомплекс на песчаном основании; L3 – галогидроморфный лимнокомплекс на песчаном основании; аллювиальные комплексы: A1 – каменные русла на наклонных поверхностях; A2 – аллювиальные комплексы на равнинных поверхностях; A3 – аллювиальные луга в пойме Чуи; A4 – пойменные болота; A5 – аллювиальные комплексы высокой поймы

них по соотношению растительности, ветши, почв и камней (рис. 4). Использовалась треугольная диаграмма, позволяющая на одной схеме визуализировать состав объектов по удельному содержанию в нем трех компонент. На рис. 4, А показан треугольник, левый угол которого соответствует 100 % удельной площади растительности, верхний угол – 100 % удельной площади камней, а правый – 100 % почвы. По доминирующим значениям этих трех компонент выделено три группы микроландшафтов, поля состава которых показаны на треугольной диаграмме ромбами: I – растительная; II – почвенная; III – каменная. Как видим, наиболее представительными для Чуйской степи являются каменная и почвенная группы. В растительной группе (с доминирующим содержанием растительности) оказалось гораздо меньше микроландшафтов.

На рис. 4, Б изображена треугольная диаграмма, отражающая компонентный состав мезоландшафтов. Левый угол треугольника соответствует 100 % содержания в мезоландшафте микроландшафтов растительной группы, верхний угол – 100 % содержания каменной группы, а правый – 100 % содержания микроландшафтов почвенной группы.

На основании принципов анализа трехмерных диаграмм состава, изложенных в работе [6], нами выделено на треугольнике семь областей. Три треугольные области, прилегающие к вершинам треугольника, соответствуют монокомпонентным экосистемам, в которых содержание какой-либо из микроландшафтных групп доминирует (доминирующая группа занимает более 60 % площади поверхности). Три трапециевидные области в основании сторон треугольника соответствуют двухкомпонентным экосистемам, в которых две группы микроландшафтов находятся в примерно равном соотношении (от 20 до 60 %), а третья не превышает 20 % по площади. Одна треугольная область в центре диаграммы соответствует трехкомпонентным экосистемам, для которых характерно примерно равное соотношение всех трех групп микроландшафтов (каждая от 20 до 60 %). Таким образом, большинство мезоландшафтов Чуйской степи представлено различными сочетаниями каменных и почвенных групп микроландшафтов. Мезоландшафты с доминированием растительной группы микроландшафтов занимают не более 15 % территории.

Рассмотрим связь вышеизложенных закономерностей с ландшафтными особенностями

территории. В Чуйской степи мезоландшафты ранга урочищ объединялись нами в геосистемы более высокого иерархического уровня (местности). Основой для типизации геосистем этого уровня послужили геолого-геоморфологические особенности Чуйской степи. На основе полевого картографирования и с учетом представлений о позднекайнозойской истории формирования рельефа и отложений [7, 8] выявлены принципиальные закономерности строения геолого-геоморфологической основы ландшафтов изученного района и выделены нижеперечисленные типы местностей.

Гляциокомплексы максимального и пост-максимального оледенения (G) слагаются из трех микроландшафтов. Пустынные и опустыненные степи на литоземах на моренном диамиктоне являются фоновым типом. Они занимают вершины и склоны моренных гряд. Площадная доля этого компонента составляет 60–70 %. Поэтому на треугольной диаграмме (см. рис. 4, Б) занимают место в поле монокомпонентных экосистем. Пустынные и опустыненные степи на пелоземах на моренном диамиктоне вкраплены в общий фон в виде регулярных пятен и полос по днищам понижений. Их площадная доля составляет 20–30 %. Пустынные и опустыненные степи на пелоземах на озерно-ледниковом алеврите в виде контуров различного размера и формы нерегулярно встречаются в эрозионных окнах. Их доля в ландшафте возрастает по мере приближения к долинам рек и достигает 10 %.

Лимнокомплекс на суглинистом (алевритовом) основании (L1) состоит из шести компонентов. Пустынные степи на литоземах на суглинистом щебнисто-галечниковом лимнии представляют зональный (фоновый) тип мезоландшафта, в среднем он занимает около половины площади комплекса. Пустынные степи и полукустарничковые пустыни на пелоземах на суглинистом (алевритовом) лимнии развиваются по дефлированным участкам и занимают около трети площади комплекса. Делювиально-пролювиальные крупнообломочные шлейфы с группировками кустарников и полукустарников занимают подчиненное положение. По соотношению “почвенных” и “каменистых” групп микроландшафтов данный комплекс относится к двухкомпонентным геосистемам (см. рис. 4, Б).

Автоморфный лимнокомплекс на песчаном основании (L2) является одним из основных типов ландшафта, представляющих днище Чуйской котловины, и состоит из следующих компонентов: опустыненные степи на криоаридных почвах на супесчаном лимнии, опустыненные степи на литоземах на песчано-супесчаном щебнистом лимнии, пустынные и опустыненные степи на криоаридных почвах на супесчаном щебнистом лимнии. Соотношение компонентов зависит от конкретных литологических условий, в частности от характера микрорельефа и гранулометрического состава верхней толщи (30–40 см) рыхлых отложений, поэтому варьирует в различных частях котловины. На рис. 4, Б этот комплекс позиционируется преимущественно в поле монокомпонентных экосистем с преобладанием почвенной группы и частично в поле двухкомпонентных почвенно-растительных экосистем.

Галогидроморфный лимнокомплекс на песчаном основании (L3) представлен одним массивом в центральной части котловины к северу от денудационного останцового массива гор Курман – Карашан. Пустынные степи на бурых аридных засоленных почвах на супесчаном щебнистом лимнии занимают повышения, эоловые надувы и примыкают к горным шлейфам. Галофитные сообщества на бурых аридных засоленных почвах на песчаном и супесчаном дресвянистом лимнии являются фоновым типом. Галофитная растительность на солончаках на песчаном и супесчаном дресвянистом лимнии развивается в наиболее пониженных замкнутых участках. Все вышеназванные галогидроморфные геосистемы приурочены к местоположениям с близким залеганием к поверхности засоленных грунтовых вод, под влиянием которых они и формируются. На рис. 4, Б этот комплекс попадает преимущественно в поле монокомпонентных экосистем с преобладанием почвенной группы.

Эллювиально-коллювиальный комплекс (С) приурочен к переходной зоне от денудационных к аккумулятивным частям склонов горного обрамления и денудационных останцов коренных пород. Он состоит из трех типов микроландшафтов, первые два из них основные, в разных частях массивов соотношение их площадей может значительно меняться: петрофитные группировки на выходах коренных пород, петрофитные группировки и фраг-

менты каменистых пустынных и опустыненных степей на петроземах гумусовых по элювиально-коллювиальным плащам, пустынные и опустыненные степи на литоземах по делювию. На рис. 4, Б этот комплекс позиционируется в поле монокомпонентных экосистем с преобладанием каменистой группы.

Делювиально-пролювиальный комплекс (Dp) распространен повсеместно в зоне контакта горных сооружений и равнинных пространств. Мезоландшафт состоит из четырех микроландшафтов. Пустынные и опустыненные степи на криоаридных почвах на супесчаном щебнистом делювии преобладают по площади и формируют фон. Сазовые степи на криоаридных засоленных супесчаных почвах развиваются по днищам бессточных ложин и образуют вкрапления вытянутой формы. Опустыненные степи на криоаридных почвах приурочены к суглинистому делювию. Пустынные и опустыненные степи на литоземах по участкам с близким залеганием коренных пород представляют собой подчиненный элемент мезоландшафта, более обычный в зоне контакта с элювиально-коллювиальными комплексами. Комплекс занимает позицию в полях почвенного и почвенно-каменистого типа экосистем (см. рис. 4, Б).

Аллювиальные комплексы (A1–A5) являются наиболее сложными и разнообразными по структуре и компонентному составу. В них сочетаются различные типы экосистем – от болотных до пустынно-степных. По соотношению слагающих их микроландшафтов они являются одно-, двух- и трехкомпонентными геосистемами. Однокомпонентные представлены растительным и каменистым типами геосистем, двухкомпонентные – каменисто-почвенным и почвенно-растительным типами. Трехкомпонентный аллювиальный комплекс представлен каменисто-почвенно-растительным типом геосистем.

Таким образом, анализ распределения всего многообразия наземных экосистем изучаемой территории в области диагностических признаков, значимых для ДДЗ, обеспечивает количественную оценку вклада различных (геология, почвы, растительность) компонент в формирование спектрального отклика ландшафтов на космических снимках. В рамках предложенного подхода к комплексному описанию ландшафтов становится возможной

характеристика иерархически структурированных геосистем для тематического картографирования с использованием ДДЗ. Это позволяет более осмысленно подходить к проблемам автоматического дешифрирования геосистемных комплексов на мультиспектральных снимках среднего пространственного разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в создании геоинформационной модели наземных экосистем Чуйской степи, ориентированной на учет признаков, определяющих спектральный отклик ландшафтов на ДДЗ, выдержана следующая логика и технологическая цепочка. Исходя из иерархической структуры геосистем и масштабной линейки космических снимков (разрешение от 2 до 30 м), мы ограничились двумя уровнями: микро и мезо. С использованием различных методик, экспертных оценок, а также на основании собственного и международного опыта дешифрирования ДДЗ выявлены компоненты экосистем, вносящие наибольший вклад в формирование спектров. Вклад этих компонент в спектральный отклик формализован в виде площадного соотношения почв, камней, растительности и ветоши по цифровым фотографиям эталонных площадок. Анализ такого рода исключительно важен по нескольким причинам. Одна из них, на наш взгляд, связана с возможностью оценки точности “калибровки” специалистов, визуально определяющих площадное соотношение различных компонентов экосистем непосредственно в поле. Кроме того, это важно, так как дает реальные цифровые показатели, что в дальнейшем позволяет правильно интерпретировать цепочку космоснимков разного разрешения.

На основании проведенного анализа выделено три группы микроландшафтов, специфичных для изучаемой территории. Следующий шаг в некотором роде подобен первому – мы оцениваем площадное соотношение групп микроландшафтов в мезоландшафтах и, используя метод треугольника с выделением семь областей, анализируем состав мезоландшафтов по удельному содержанию “каменистых”, “почвенных” и “растительных” групп микроландшафтов. Преимущество призна-

ков при переходе между иерархическими уровнями, а также жестко определенные количественные признаки на каждом уровне позволяют использовать данную модель при дальнейшем анализе ДДЗЗ, картографировании ландшафтов, построении тематических и аналитических карт. Разработанные базы геоданных являются одним из этапов единого технологического цикла от полевых исследований до создания тематических ландшафтных карт, а также банков геоданных для использования ДДЗЗ при картографировании и мониторинге наземных экосистем. Полученные описания мезоландшафтов можно использовать в качестве основных классов при проведении автоматических классификаций и для разработки легенд к ландшафтным и тематическим среднemasштабным картам.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 56 (Алтайский экорегион) и РФФИ (грант № 08-04-00055).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 347 с.
2. Айриянц А. А., Борисенко А. С., Добрецов Н. Н. и др. Опыт создания баз данных и метаданных Алтайского экорегиона // Геоинформатика. 2003. № 4. С. 13–19.
3. Добрецов Н. Н., Зольников И. Д., Королюк А. Ю. и др. Разработка системы комплексного описания полигонов для интерпретации данных космической съемки // Сиб. экол. журн. 2005. Т. XII, № 6. С. 1031–1038.
4. Шишов Л. Л. и др. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
5. Сочава В. Б. Теоретическая и прикладная география. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2005. 288 с.
6. Верзилин Н. Н. О классификации осадочных пород при литолого-палеографических исследованиях // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 11. С. 131–141.
7. Девяткин Е. В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая // Тр. ГИН. Вып. 126. М.: Наука, 1965. 243 с.
8. Новиков И. С. Морфотектоника Алтая. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. 313 с.

Development and Compilation of the Geographical Database for Mapping and Modeling Land-Based Ecosystems by Means of GIS and DZ with the Chuya Steppe in Mountainous Altay as Example

I. D. ZOL'NIKOV*, A. Yu. KOROLYUK**, E. N. SMOLENTSEVA***, V. A. LYAMINA*, N. N. DOBRETSOV *, U. V. MARTYSEVICH*

* *Institute of Geology and Mineralogy SB RAS
630090, Novosibirsk, Koptyug ave., 3*

** *Central Siberian Botanical Garden SB RAS
630090, Novosibirsk, Zolotodolinskaya str., 101
E-mail: akorolyuk@rambler.ru*

*** *Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry SB RAS
630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 18*

A system of integrated multiparametric description of landscapes of micro- and meso-hierarchical levels is developed. On the basis of field descriptions made according to this system in the Chuya steppe, a geographical database was compiled; it contains qualitative and quantitative characteristics of the land-based ecosystems of the Chuya steppe and their major components (relief, rocks, soil, vegetation). The technology for automated calculation of the ratio of abiotic to biotic components of micro-landscape on the basis of digital photographs of the reference grounds was tested. Using the triangular diagrams, the component composition of meso-landscapes was analyzed. The results may be used to decipher and interpret the data of remote probing sensing of the Earth, and also for mapping and modeling geosystems at the local and regional levels.

Key words: geographical databases, remote sensing data, geoinformation modeling, land-based ecosystems.