

Т.В. Байкалова, А.В. Евтюшкин

Выделение моренных комплексов плоскогорья Укок на космических радарных и сканерных изображениях с использованием трехмерной цифровой модели рельефа

В последние годы огромное внимание уделяется изучению и исследованию горных областей Алтая, среди которых особое место занимает плоскогорье Укок. Этот интерес связан с особенностями геологического формирования данного района, с его уникальной природой и освоением территории Горного Алтая в историческом прошлом. В настоящее время плоскогорье Укок интересует исследователей не только с теоретической, но и практической точки зрения, о чем свидетельствуют разрабатываемые проекты строительства путей сообщения между Республикой Алтай и Китаем. Однако важным условием для разработки плана рационального природопользования в этом районе является знание закономерностей происходивших в прошлом и происходящих сейчас природных процессов.

Цель данного исследования – определение возможности совместного использования данных дистанционного зондирования и цифровых трехмерных моделей рельефа для распознавания и изучения гляциальных форм рельефа в отсутствие других источников информации.

В качестве исходных данных в работе использовались изображения, полученные 1 октября 1994 г. радиолокационной системой с синтезированной апертурой SIR-C, установленной на космическом корабле Space Shuttle. Длина волны излучения 5,6 см (С-диапазон). Радиолокатор имеет три варианта настройки антенны (HH, HV – поляризации, TP – полная энергия). Снимки с разрешением на местности порядка 12,5 м охватывают территорию с линейными размерами около 32x107 км. Кроме радарных, использовались также сканерные изображения МСУ-Э от 19 июня 1998 г. с разрешением 45 м, полученные системой «Ресурс» в трех спектральных каналах – 0,5–0,6, 0,6–0,7, 0,8–0,9 мкм. Предварительно все изображения пересчитывались в проекцию Гаусса-Крюгера по опорным точкам в ГИС ArcView 3.2.

Плоскогорье Укок располагается в наиболее приподнятой юго-восточной части Алтайских гор. Оно возникло в результате активных процессов эрозии и денудации, которые

господствовали на Алтае в мезозое и палеоген-неогене. Эти процессы сформировали пологосклонный рельеф поверхности выравнивания, которая сохранилась на большей части плоскогорья. Рельеф территории представляет собой сочетание куполообразных или плосковершинных возвышенностей, поднимающихся на 250–300 м над широкими долинами с плоскими днищами. Поверхность плоскогорья осложнена Бертекской и Тархатинской внутригорными впадинами, внутренний рельеф которых сформировался в результате деятельности двух последовательных оледенений в позднем плейстоцене и голоцене. Область питания древних ледников располагалась на хребтах Южный Алтай, Сайлюгем, Монгольский Алтай и горном узле Табын-Богдо-Ола, где до сих пор сохранились современные каровые ледники. Самым крупным ледником Юго-Восточного Алтая является Алахинский ледник, от которого берет свое начало р. Ак-Алаха. Язык ледника разделен срединной мореной на две части. Другие современные ледники располагаются в верховьях р. Канас, Укок, Аргамджи, Кара-Чад и имеют одноименные названия с речными системами соответственно. На территории Китая хорошо дешифрируются ледники Халаси, находящиеся в верховьях р. Сангадыр, которая впадает в оз. Аккуль. Язык данного ледника многослойный, образован в результате слияния трех языков, наползающих друг на друга. Слоистость хорошо выделяется при преобразовании гистограмм каналов синтезированного сканерного изображения МСУ-Э методом Гаусса в пакете программ ENVI 3.2. На территории Монголии распознаются ледники Потанина и Александры, языки которых стекают в одну долину р. Цаган-Сала-Гол и разделены срединной мореной; ледник Гране (сток в долину Цаган-Сала-Гол). На синтезированных радиолокационном и сканерном снимках хорошо выделяются языки ледников, области питания распознаются хуже вследствие неудачного времени съемки (рис. 1) [1]. Однако лед легко отделяется от снега на изображении третьего ближнеинфракрасного канала сканера МСУ-Э.

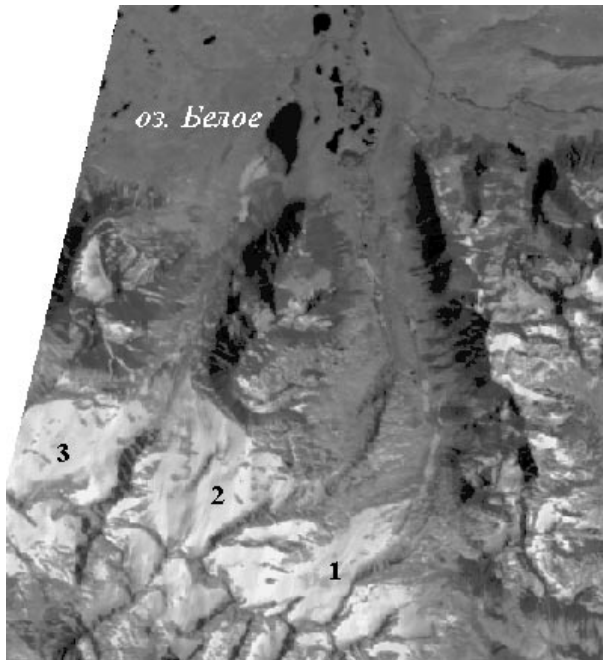


Рис. 1. Изображение МСУ-Э от 19 июня 1998 г:
1 – ледник Канас; 2 – Алахинский ледник;
3 – ледник Укок

При обработке трехканального сканерного изображения методами контрастирования и эквализации гистограммы дешифрируются поверхности конечно-моренных комплексов, свидетельствующих о современной деятельности ледников. Моренные комплексы, образованные в результате аккумулятивной деятельности Алахинского ледника и ледника Халаси, подпруживают сток рек и образуют естественные плотины на оз. Белом и Аккуль (северный Китай). По описанию Н.Н. Михайлова, морена в районе оз. Белого состоит из двух хорошо выраженных боковых морен и конечного вала высотой 30–40 м, который прорезан рекой в его центральной части [2]. В районе данного озера на снимках выделяется также мощная наледь.

О наличии древнего оледенения на данной территории свидетельствуют моренные комплексы, располагающиеся в пределах Бертекской котловины. Границы распространения наиболее крупных морен, соответствующих разным временным периодам оледенения, хорошо дешифрируются на космических изображениях. На радиолокационном снимке они выделяются в виде ярких линий, образованных за счет максимального отражения радиолучения от стенок морен, обращенных к приемной антенне локатора. В оптическом диапазоне главным дешифровочным признаком этих объектов является разная по составу растительность, произрастающая на различных по возрасту моренных холмах. Однако наи-

более достоверно моренные образования выделяются при наложении космического снимка на трехмерную модель рельефа (Digital Elevation Model) Бертекской впадины, построенную по технологии, описанной ниже.

Построение трехмерной сетки производилось по значениям отметок высот точек, содержащихся в массиве Z. Элементы массива Z выбираются из данных XYZ, которые характеризуют положение и абсолютную высоту точек изолиний рельефа в системе координат Гаусса-Крюгера. Изолинии, высота сечения которых 40 м, оцифровывались в ГИС ArcView 3.2 на карте масштаба 1:100000. Базовые точки после оцифровки располагались в пространстве нерегулярно, поэтому величина Z интерполировалась для построения узлов регулярной сетки.

Изображение сетки строилось в пакете программ ERMapper 6.0 методом триангуляции в два этапа. На первом этапе создается нерегулярная триангуляционная сеть. Местоположение и высотные отметки каждой вершины сетевого треугольника соответствуют значениям элементов массива XYZ. Результатом этого действия является построение неоднородной трехмерной модели поверхности. На втором этапе происходит сгущение нерегулярной координатной сетки между точками в соответствии с заданным шагом интерполяции методом линейного приближения, в результате которого вычисляются и строятся дополнительные вершины триангуляционной сети, и КЕМ становится однородным. Коррекция модели проводится по контрольным высотным точкам, в данном случае это отметки высот триангуляционных и полигометрических пунктов геодезии, командных высот и урезов воды. Метод триангуляции работает лучше всего, когда базовые точки равномерно распределены на моделируемой поверхности.

Использование КЕМ значительно упрощает процесс дешифрирования и позволяет составить целостное представление о рельефе местности. Для построения трехмерных изображений с использованием радиолокационного и сканерного снимков применялась модель с разрешением в плане 12,5 и 30 м соответственно. С целью устранения шумовых эффектов, возникающих при рассеянии радиоволн, трехканальное радиолокационное изображение (РЛИ) предварительно обрабатывалось методом главных компонент. Визуализация перспективных изображений проводилась в пакете ENVI 3.2. При этом фактор абсолютной высоты (фактор Z) превышал реальный ($z = 1$) в несколько раз, что позволило наиболее эф-

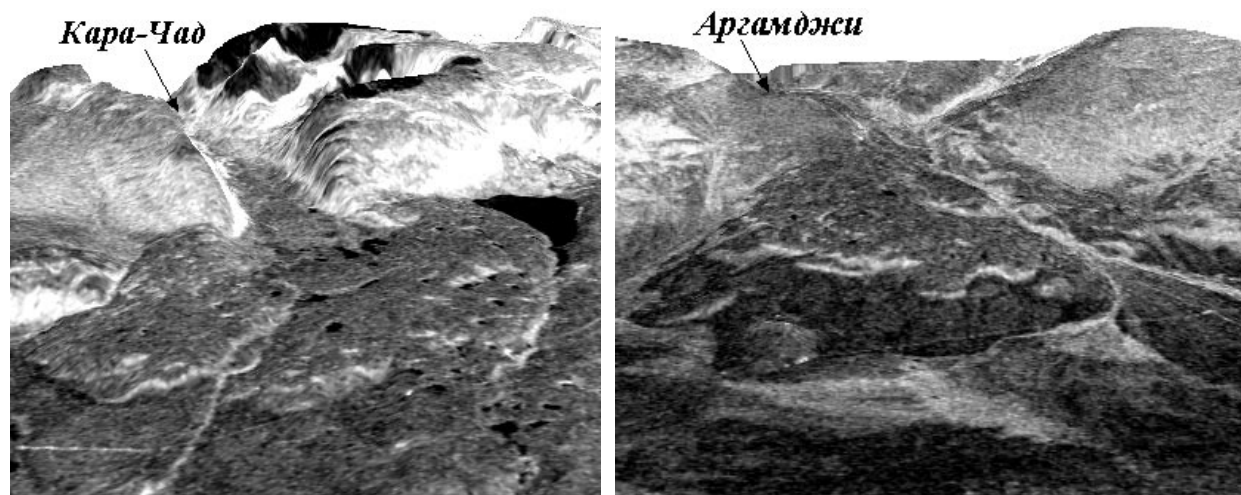


Рис. 2. Совместное использование радиолокационного изображения и трехмерной модели рельефа для выделения конечно-моренных комплексов

фективно разделить многослойные моренные комплексы на отдельные составляющие (рис. 2).

В зависимости от сложности строения рельефа внутригорную Бертекскую котловину можно подразделить на два участка: Алахинский (долина р. Ак-Алаха) – более сложный, Калгутинский (долина р. Калгуты) – более простой [3–4]. Первый моренный комплекс, который распознается на радиолокационном изображении, обработанном с помощью метода главных компонент, располагается на западе Алахинского участка в долине р. Укок на высоте 2400 м. Этот комплекс, по описанию Н.Н. Михайлова [2], закрывает вход в долину этой реки. В долине Бетсу-Канас – правого притока Ак-Алахи – и верховьях самой Ак-Алахи морены не выделяются вследствие их небольших размеров и ограничения в разрешении космических снимков и КЕМ. Следующий конечно-моренный комплекс расположен выше слияния Ак-Алахи и Чолок-Чад на высоте около 2200 м. Отчетливо моренный вал распознается только в долине реки. Поверхность морены задернована, понижения заняты озерами и болотами. Наиболее мощные моренные отложения дешифрируются в северной части Бертекской впадины в районе слияния рек Ак-Алаха, Кальджин, Калгуты, Музды-Булак. Границы распространения этого комплекса свидетельствуют о максимальном продвижении ледника внутрь котловины. Комплекс состоит из нескольких разновозрастных морен, которые хорошо выделяются на космических изображениях. Более древняя морена сохранилась лишь фрагментарно. Она располагается по правому и левому берегу р. Музды-Булак и является естественной границей Калгутинского участка котловины. Поверхность морены сглажена и ха-

рактеризуется меньшей заозеренностью. Западнее данного комплекса расположены две более молодые интенсивно-бугристые морены, вложенные одна в другую. Поверхности морен осложнены большим количеством термокарстовых впадин, занятых озерами. На междуречье Ак-Алахи и Кальджина на склонах этого комплекса дешифрируются солифлюкционные формы рельефа. В районе оз. Музды-Булак дешифрируются фрагменты двух морен, а в долине самой реки – мощная наледь. В долине Кальджина удается выделить только две морены. Одна из них является естественной плотиной оз. Кальджин-Куль и имеет высоту 2400 м. Другая простирается вдоль всей долины реки и характеризуется простым строением и сглаженностью форм (абсолютная высота – 2100 м).

В Калгутинском понижении Бертекской котловины выделяется несколько мощных конечно-моренных комплексов, расположенных в южной части территории.

Первый из них располагается у выхода долины Кара-Чад в Калгутинское понижение и представляет собой интенсивно-бугристую заозеренную морену, сходную с молодыми комплексами Алахинского понижения. На эту морену наложены еще три более молодые. Непосредственно в горной части долины р. Кара-Чад моренные холмы выделить не удастся. Следующий конечно-моренный комплекс фиксируется в Калгутинском понижении в долине Аргамджи-2, он состоит из двух напластованных друг на друга языков морены. Максимальное продвижение ледника по долине Аргамджи-3 в котловину отмечено мощным интенсивно бугристым конечно-моренным комплексом. В настоящее время у его подножья сформировался обширный флювиогляциальный

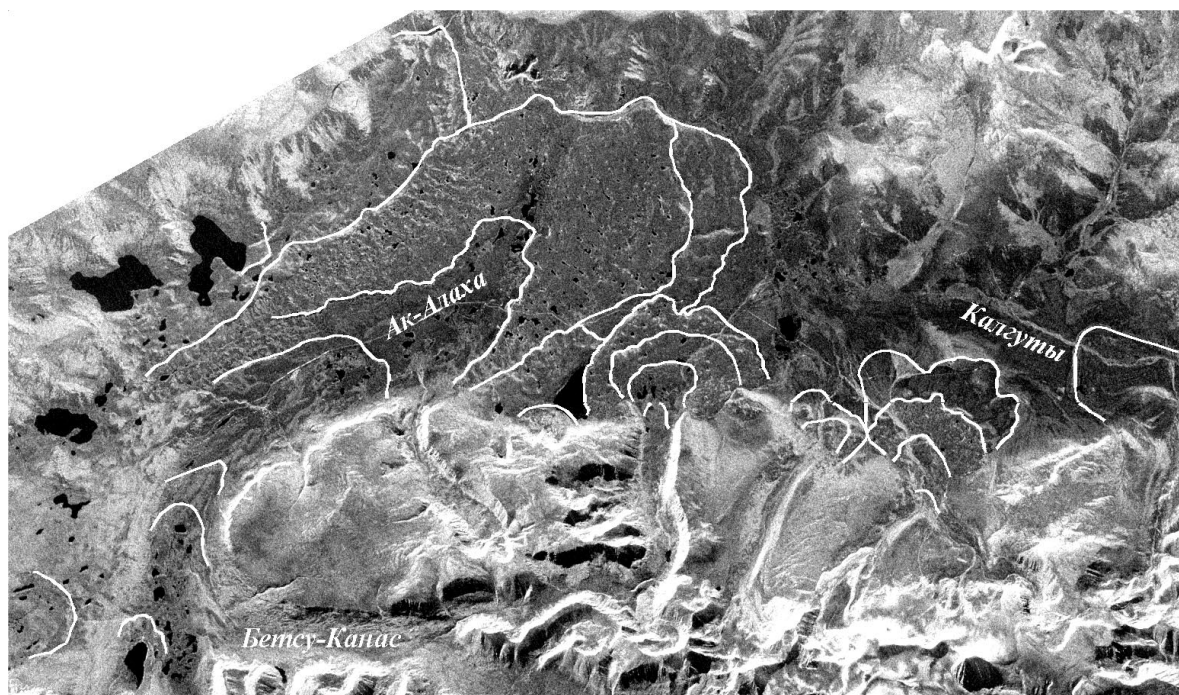


Рис. 3. Радиолокационное изображение моренных комплексов Бертекской котловины

конус выноса. В данный моренный комплекс вложены еще несколько морен. Последнюю из них удастся выделить в горной части долины на высоте 2600 м. В долине Калгуты на РЛИ выделяется только одна конечная морена за счет максимального отражения излучения от ее стенок. На перспективном изображении данная морена не распознается вследствие небольших относительных высот. На рисунке 3 представлены границы распространения моренных комплексов Бертекской котловины, выделенные на радиолокационном изображении с использованием трехмерной модели рельефа.

Анализ результатов дешифрирования РЛИ, полученных системой JERS-1 (31 июля 1992 г. и 13 апреля 1997 г.) в L-диапазоне при НН-поляризации, показал, что на данных изображениях достоверно распознаются только ледники, а выделение конечно-моренных комплексов не представляется возможным. Это можно объяснить неудачным диапазоном и поляризацией радиосигнала, а также углом визирования аппаратуры.

Растительные сообщества исследуемой территории отличаются простотой и представлены травянистой растительностью альпийских лугов, распространенных на вершинах Южно-Алтайского хребта, и кустарниковой растительностью высокогорных степей. На западе территории произрастают лиственничные леса. На синтезированных радиолокационных изображениях достоверно дешифрируются леса и поросли карликовой березы высотой 30 см. Од-

нако видовой состав растительности альпийских лугов и высокогорных степей распознать на РЛИ не представляется возможным. Данная задача успешно решается в процессе обработки гистограммы синтезированного сканерного изображения МСУ-Э методами Гаусса и эквализации.

Сравнительный анализ результатов дешифрирования гляциальных форм рельефа на перспективных изображениях, построенных с использованием космических снимков и цифровых трехмерных моделей рельефа, показал, что наиболее достоверно моренные комплексы выделяются, если разрешение модели совпадает с разрешением снимка. Однако мощные конечно-моренные комплексы распознаются и на моделях невысокого разрешения, например, на Global Toro30 (разрешение в плане 500 м). Данная модель построена в проекции UTM с учетом всей территории земного шара и доступна в сети Internet.

Для совмещения с изображением МСУ-Э GТoro30 пересчитывалась в проекцию Гаусса-Крюгера, а разрешение в плане было увеличено до 250 м. В данном случае на эффективность выделения гляциальных форм рельефа влияют дешифровочные свойства снимка, а не разрешение модели. В процессе изучения рельефа территории Горного Алтая, Монголии и Китая по космическим изображениям (фотоснимок КАТЭ-140, станция «Салют-6») и трехмерной модели Global Toro30 были подтверждены обнаруженные ранее котловины, подобные

Бертекской, с мощной системой конечно-моренных комплексов, в частности, в Монголии – котловина в районе оз. Хотон Нуур и Хоргон Нуур, в Республике Алтай на юго-востоке Чуйской степи – долина Джолийн.

В начале 2000 г. была проведена топографическая радиолокационная съемка поверхно-

сти Земли системой Space Shuttle (миссия SRTM), по результатам которой в конце 2003 г. планируется построение глобальной цифровой модели рельефа всего земного шара с разрешением в плане 30 и 90 м. Данная модель будет также доступна всем пользователям в сети Internet.

Литература

1. Дешифрирование ледниковых форм рельефа на радиолокационных изображениях / Т.В. Байкалова, А.В. Евтюшкин, С.И. Жилин, К.В. Казанцев, А.Г. Редькин // Ингеркарто-4: ГИС для оптимального природопользования в целях устойчивого развития территорий: Материалы междунар. конф. Барнаул, 1-4 июля 1998 г. Барнаул, 1998.

2. Михайлов Н.Н. Еще раз к вопросу о позднеплейстоценовом оледенении Юго-Восточного Алтая

и его дегляциации // Известия АГУ. 2000. №3.

3. Редькин А.Г. Лимно-гляциальные комплексы плоскогорья Укок и их классификация // Палеогеография нивально-гляциальных систем Горного Алтая: Тез. докл. науч. чтений. Томск, 1996.

4. Михайлов Н.Н., Редькин А.Г. Лимно-гляциальные комплексы плоскогорья Укок // География и природопользование Сибири. Барнаул, 1997. Вып. №2.