

## Использование ГИС и ДДЗЗ при картографировании геолого-геоморфологических объектов (на примере Чуйской котловины)

И.Д. Зольников<sup>1,2</sup>, Н.В. Глушкова<sup>1</sup>, В.А. Лямина<sup>1,2</sup>,  
Е.Н. Смоленцева<sup>3</sup>, А.Ю. Королюк<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии СО РАН  
630090 Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3  
zol@uiggm.nsc.ru;*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет  
630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

<sup>3</sup>*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630099 Новосибирск, ул. Советская, 18  
smolentseva@issa.nsc.ru*

<sup>4</sup>*Центральный сибирский ботанический сад СО РАН  
630090 Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101  
akoroluk@csbg.nsc.ru.*

Статья посвящена использованию космических снимков MODIS, Landsat, а также цифровых моделей рельефа на основе данных SRTM для картографирования четвертичных отложений и рельефа на примере Чуйской котловины в Горном Алтае. Рассматривается комплексная технология ГИС и ДЗ, включающая разработку и создание междисциплинарных баз геоданных с характеристиками рельефа, геологии, почв и растительности типовых природно-территориальных комплексов. Для выявления областей распространения и границ гетерогенных геолого-геоморфологических выделов полигенетической природы применяется построение плотностных сеток. Анализ спектральных характеристик картографируемых объектов ведется на уровнях мелкомасштабного и среднемасштабного пространственного разрешения, что позволяет выявить закономерности генерализации спектральных и морфометрических характеристик. Разработанная комплексная технология позволяет выявлять такие геолого-геоморфологические закономерности, которые не всегда фиксируются натурными наблюдениями непосредственно на дневной поверхности.

**Ключевые слова:** ГИС, ЦМР, MODIS, Landsat, рельеф, четвертичная геология.

### Введение

При исследовании природных систем какой-либо территории мы зачастую имеем дело с пространственной неоднородностью геолого-геоморфологической основы ландшафтов. В значительной степени она обусловлена существованием полигенетических типов четвертичных отложений, наряду с простыми генетическими типами. Нередко простые генетические типы объединяются в полигенетические комплексы отложений и рельефа. В таких случаях возникают проблемы выделения и разграничения в пространстве сложных геолого-геоморфологических образований, обуславливающих наличие пестрых, мозаичных природно-территориальных комплексов. Особенно остро такие проблемы встают при использовании Данных Дистанционного Зондирования Земли из космоса (ДДЗЗ) для картографирования рельефа, четвертичных отложений, ландшафтов. В работе рассматривается применение технологий ГИС и ДЗ для анализа гетерогенных комплексов четвертичных отложений и рельефа.

В практике научно-исследовательских и съемочных работ компьютерное картографирование геолого-геоморфологических объектов чаще всего проводится вручную путем

векторной оцифровки по растровым подложкам – цифровым моделям рельефа, растровым топокартам, аэро и космоснимкам. Ручная оцифровка вносит значительную долю субъективности в картографические материалы, создаваемые на основе ДДЗЗ. Использование технологий автоматической обработки растровых изображений в случаях со сложно организованными природно-территориальными комплексами вызывает затруднения в связи с неоднозначностью проведения границ между внутренне неоднородными выделами, представляющими собой области мозаичного распределения пикселей, существенно различающихся по яркости спектров. Аналогичные проблемы возникают при анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР), полученных на основе спутниковой съемки из космоса. Например, холмисто-западинный рельеф будет формировать в пределах области его распространения мозаичную ассоциацию элементарных площадок с разными углами и азимутами падения склонов. Нами предпринята попытка использования космических снимков мелкого (MODIS) и среднего (Landsat) пространственного разрешения, а также ЦМР на основе Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) для анализа и картографирования комплексов четвертичных отложений и рельефа разной сложности.

Территорией исследования для апробации технологического подхода выбрана Чуйская высокогорная котловина в Горном Алтае. Данный выбор обусловлен тем, что Чуйская котловина расположена в межгорной впадине, ограниченной горными хребтами, массивами и плато. Поэтому она является достаточно автономной в морфолитогеогенетическом и ландшафтном аспектах территорией, имеет конечный и вместе с тем довольно разнообразный набор природно-территориальных комплексов (ПТК). Кроме того, исключение из геоинформационного анализа горного обрамления Чуйской степи позволяет снизить эффект влияния угла наклона и экспозиции склонов на отраженный от земной поверхности сигнал в связи со слабой расчлененностью рельефа. На этой территории на протяжении нескольких лет сотрудниками ЦСБС, ИПА, ИГМ СО РАН проводились комплексные междисциплинарные экспедиции. В результате наземных исследований и сбора данных была разработана унифицированная система многопараметрической характеристики ландшафтов, включающая описание геолого-геоморфологического строения, почв и растительности [1, 2]. Особое внимание уделялось индикаторным признакам, играющим ключевую роль в формировании спектральных характеристик космоснимков. Таким образом, исследуемая территория в достаточной мере обеспечена натурными полевыми наблюдениями для верификации результатов обработки ДДЗЗ.

### **Методы и фактический материал**

Разработанная технология реализована на базе программных пакетов ENVI и ArcGIS, с использованием космических снимков различного пространственного разрешения (QuickBird, Landsat, SPOT, MODIS) и ЦМР (SRTM, ASTER) на различных эталонных полигонах Западной Сибири. В статье обсуждаются конкретные результаты, полученные в результате обработки ДДЗЗ мелкого и среднего разрешения: Landsat, MODIS, SRTM. Комплексная технология состоит из нескольких этапов.

1) Разработка и создание баз геоданных, включающих унифицированные по междисциплинарному стандарту геолого-геоморфологические, почвенные и ботанические характеристики ПТК. Для этого, в частности, осуществлялось фотографирование эталонных

участков земной поверхности  $1 \times 1 \text{ м}^2$ . Затем, в лабораторных условиях по цифровым фотографиям проводилось автоматическое определение удельной площади абиотических и биотических составляющих ПТК. Обработка цифровых фотографий в камеральных условиях позволяет получать информацию о процентном соотношении биотических и абиотических компонент ландшафтов и количественно оценивать такие показатели как: каменистость, проективное покрытие растительности, долю открытой почвы и т.п. Базы геоданных дополняются спектральными библиотеками, полученными в результате изучения спектрального отклика компонентов ландшафта на космоснимках выбранного пространственного разрешения. Спектральные библиотеки составляются по комплексно описанным в поле контурам. Таким образом, контур объекта представляет собой метрическую составляющую, а комплексное описание – семантическую составляющую базы геоданных, которая оформлена в векторном формате ГИС (в нашем случае – ArcGIS).

2) Анализ ЦМР. Цифровые модели рельефа для Чуйской степи были построены на основе SRTM в двух вариантах: среднего пространственного разрешения с шагом сетки 30 м (соответствие космоснимку Landsat) и мелкого пространственного разрешения с шагом сетки 500 м (соответствие космоснимку MODIS). На основе статистического анализа основных морфометрических показателей (высоты, углы и азимуты падения) были выделены типовые интервалы их значений. Затем элементарные площадки (узлы сетки) были расклассифицированы в соответствии с комбинаторными сочетаниями типовых интервалов значений вышеуказанных морфометрических показателей. Кроме того, проводилась неуправляемая классификация по морфометрическим показателям методом ISODATA. Для этого все три морфометрических показателя нормировались на максимум. У аспектов западные экспозиции приравнялись к восточным, т.е. использовалась шкала порядка от северной экспозиции к южной с изменением значений от 0 до  $180^0$ . В данном случае такая нормировка обоснована тем, что для Чуйской котловины различие между северной и южной экспозицией склона имеет гораздо большее значение, нежели различие между западной и восточной экспозициями как в ландшафтном плане, так и в плане специфики морфолитогенеза, отразившейся в рельефе земной поверхности. Кроме того, для выявления контрастных геоморфологических границ использовалась вторая производная рельефа. Таким образом, были получены морфометрические классификации территории, как для обзорного, так и для средне-масштабного уровня.

3) Анализ спектральных характеристик космоснимков. Для анализа использовались следующие каналы Landsat (1-5, 7) и следующие каналы MODIS (1-7, исключая канал 3, поскольку он имеет дефекты). На основе комплексных характеристик баз геоданных были сформированы спектральные библиотеки на территорию Чуйской степи с эталонными спектрами типовых геолого-геоморфологических объектов. Затем, на основе обучения по эталонным участкам была сделана управляемая классификацией методом максимального правдоподобия. Для сравнения была также сделана неуправляемая классификация методом ISODATA. Классификации проводились как для снимков MODIS, так и для снимков Landsat. В ходе сравнения результатов классификаций анализировалась генерализация спектральных характеристик от уровня среднего пространственного разрешения к обзорному. На основе статистического анализа спектральных характеристик проводилось изучение степени сходства и различия спектральных кривых типовых геолого-геоморфологических объектов и верификация результатов обработки цифровых изображений данными наземных наблюдений из баз геоданных.

- Картографирование гомогенных и гетерогенных геолого-геоморфологических выделов. Картографирование геолого-геоморфологических объектов осуществлялось от общего к частному. Сначала картографировались крупные выделы, проявившиеся в спектральных и морфометрических характеристиках ДДЗЗ обзорного уровня (ЦМР и космоснимок MODIS), затем более детальные выделы по результатам классификаций ДДЗЗ среднего пространственного разрешения (ЦМР и космоснимок Landsat). На обзорном уровне в результате генерализации геолого-геоморфологических характеристик местности выделились преимущественно гомогенные области, а на среднемасштабном – увеличилось число выделов и многие из них приобрели гетерогенный характер. В результате статистического анализа были выделены типовые сочетания элементарных выделов (с характерными диапазонами спектральных и морфометрических признаков), формирующие гетерогенные области. Для выявления границ между геолого-геоморфологическими объектами сложного состава использовались плотностные сетки, позволяющие учесть территориальное изменение удельного площадного содержания элементарных выделов, составляющих сложные природно-территориальные комплексы.

### Обсуждение результатов

Чуйская котловина вытянута с запада на восток примерно на 80 км и достигает в поперечнике 36 км (рисунок 1). Ее днище имеет слабо вогнутую форму с абсолютными отметками в среднем от 1720 до 2200 м над уровнем моря. С севера она ограничена Курайским хребтом, с юга Южно-Чуйским хребтом и Сайлюгемским плато. С учетом представлений о четвертичной истории формирования рельефа и отложений [3, 4], здесь развиты гляциокомплексы среднелепистоценового максимального оледенения ( $g_{II_{2-4}}$ ), а также верхнелепистоценовых первого постмаксимального ( $g_{III_2}$ ) и второго постмаксимального ( $g_{III_4}$ ) оледенений, занимающие преимущественно юго-западную окраину Чуйской котловины. Остальную прибортовую часть котловины покрывают осыпи ( $c_{III-IV}$ ) и делювиально-пролювиальные шлейфы ( $d-p_{III-IV}$ ), а внутреннюю область – озерные осадки ледниково-подпрудных бассейнов позднего неоплейстоцена ( $III_4$ ). Северную прибортовую часть днища вдоль Курайского хребта занимает поле аллювиального позднелепистоценового рельефа ( $a_{III_{3-4}}$ ).

При анализе ЦМР мелкого пространственного разрешения ярко проявились морфоструктурные особенности Чуйской котловины, обусловленные спецификой ее неотектонического развития. По морфометрическим показателям выделились несколько крупных однородных сегментов днища. Предгорная делювиально-пролювиальная равнина равнина южной экспозиции с углами падения склонов от  $2^0$  до  $5^0$  протягивается вдоль северного борта котловины полосой до 7-8 км ширины. Юго-восточнее расположена пологая аллювиальная равнина с углами падения менее  $0,5^0$  на запад, северо-запад. При этом западные аспекты наряду с северо-западными наблюдаются только в северо-западной половине равнины, а в юго-восточной ее половине доминирует исключительно северо-западная экспозиция. Таким образом, по морфометрии рельефа вычленяется самый молодой грабен (вероятно голоценового возраста) в долине Чуи.

В западной части Чуйской степи с северо-запада на юго-восток последовательно выделяется еще четыре морфоструктурных сегмента. К западному борту котловины прилегает область холмисто-грядового ледникового рельефа, отчлененная береговыми

абразионными уступами от озерной равнины. И гляциальный рельеф и примыкающая к нему озерная равнина имеют наклон на северо-восток под углами от  $0,8$  до  $2^{\circ}$ . Однородность морфометрических показателей этих двух разных генетических типов четвертичных отложений и рельефа указывает на тот факт, что озерная равнина выработана в этом сегменте на цоколе из морен и флювиогляциальных галечников. Таким образом, по морфометрии фиксируется область распространения на дне котловины под озерными осадками средненеоплейстоценового гляциокомплекса. К юго-востоку от погребенного под озерными осадками среднечетвертичного гляциокомплекса следующий сегмент днища Чуйской котловины четко отчленяется по линейной границе (геологический разлом) за счет выполаживания углов падения склонов (в среднем  $0,5-0,8^{\circ}$ ) и переходом азимутов падения на северные. Здесь моренный цоколь под озерными отложениями отсутствует. Следующий сегмент, не отличаясь от предыдущего по углам падения, тем не менее, четко отчленяется по добавлению азимутов северо-западной экспозиции к северной. Последний сегмент представляет собой фрагментированный на разнонаправленные грани останец Сайлюгемского плато, полого уходящий уступом под четвертичный чехол, закрывающий днище Чуйской котловины. Таким образом, по морфометрическим показателям, полученным на основе ДДЗЗ SRTM, отражается блочное строение фундамента Чуйской котловины. Рассмотренные основные крупные геоморфологические сегменты котловины предопределили направление перераспределения обломочного материала от бортов к центральной части впадины и контролировали локализацию разных генетических типов четвертичных отложений и рельефа.

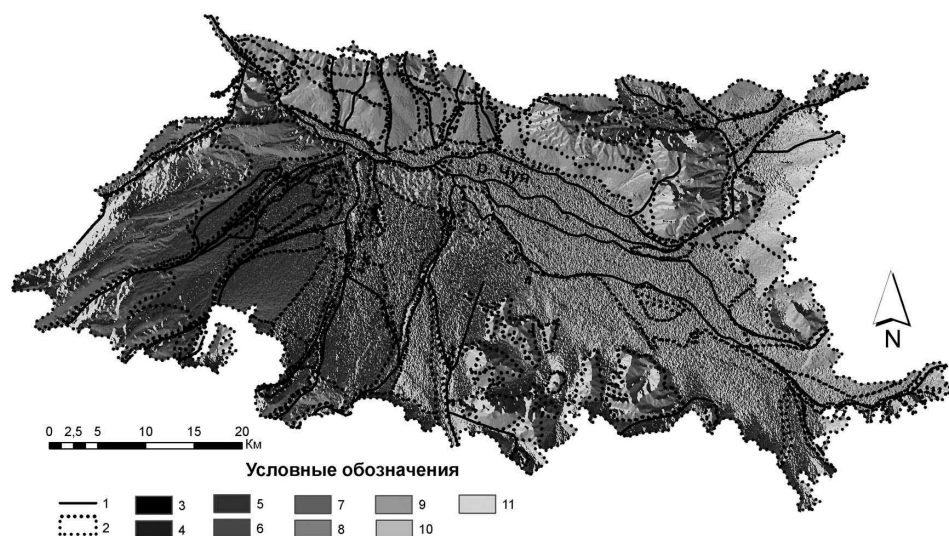


Рис. 1. Схема азимутов падения склонов Чуйской котловины.

Условные обозначения: 1 - реки, 2 - геолого-геоморфологическая схема территории, 3 - плоские участки, 4 - север, 5 - северо-восток, 6 - восток, 7 - юго-восток, 8 - юг, 9 - юго-запад, 10 - запад, 11 - северо-запад

На рисунке 2А показаны типовые эталонные спектры MODIS для наиболее типичных гомогенных геолого-геоморфологических выделов территории. Наиболее контрастно различаются аллювиально-болотный пойменный комплекс с одной стороны и не задернованные озерные алевриты, а также солончаки с другой. Специфические спектральные кривые имеют коллювиальные шлейфы на эрозионных останцах и делювиально-пролювиальные шлейфы на бортах котловины. Более близкую позицию занимают степ-

ные ПТК на разных генетических типах отложений. Однако, как мы видим, их спектральные кривые имеют индивидуальные различия и образуют ряд изменений от каменистых и пустынных степей на моренах и пустынных степей на озерной террасе с моренным цоколем до опустыненных степей на озерной равнине и сухих степей на озерно-аллювиальной равнине. Эти индивидуальные различия спектров обусловлены различным удельным соотношением проективного покрытия растительности, каменистости (наличие щебня и гальки) и гранулометрического состава мелкозема почвенного субстрата (в ряду суглинистость-опесчаненность).

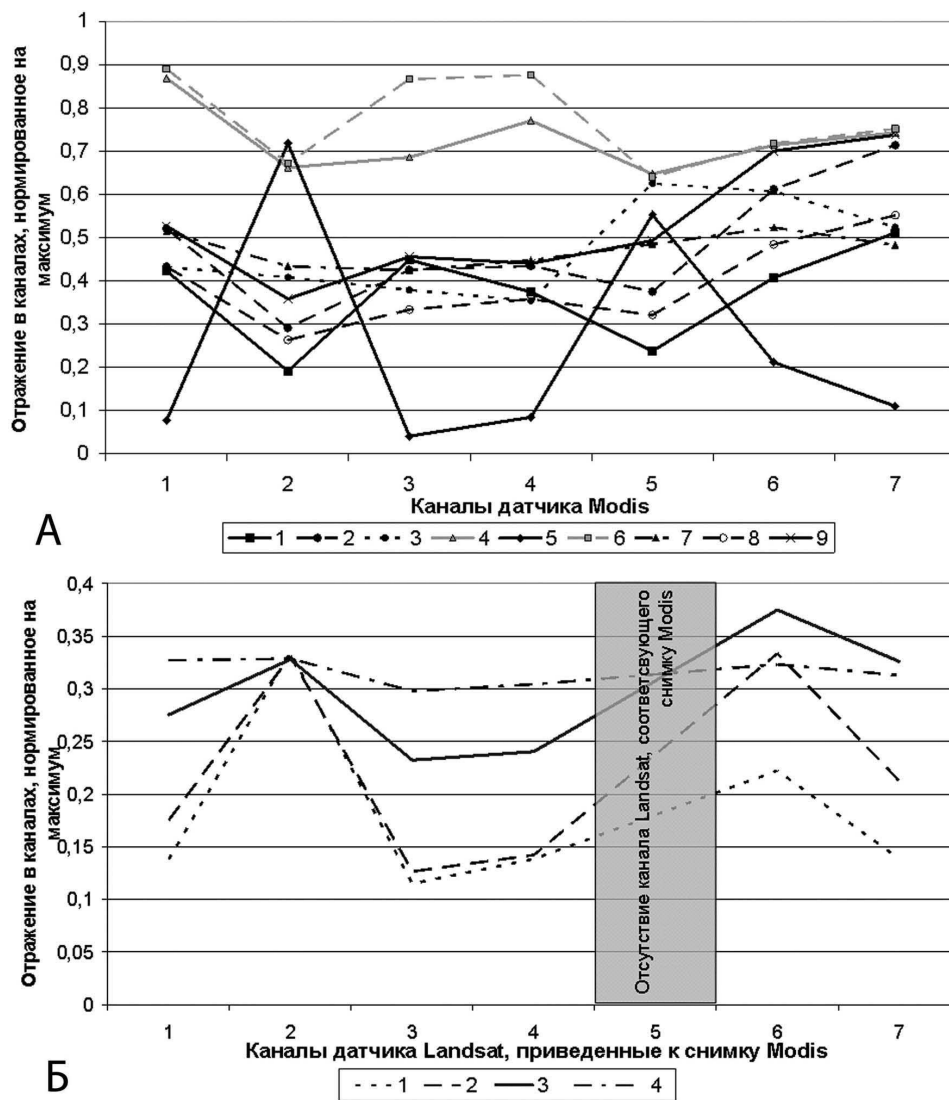


Рис. 2. Типовые спектры: А.- геолого-геоморфологические выделы по снимку Modis от 10 июля 2008г. Условные обозначения: 1 - морена, 2 - лимний, 3 - лимноаллювий, 4 - солончаки, 5 - аллювий, 6 - алевриты, 7 - колювий, 8 - лимний на морене, 9 - делювий.  
Б. - аллювий по снимку Landsat от 4 сентября 2001г.  
Условные обозначения: 1 - высокая пойма, 2 - пойма, 3 - первая терраса, 4 - русловый аллювий

Таким образом, сочетание анализа спектров и морфометрических показателей по ДДЗЗ мелкого пространственного разрешения позволило выявить новые морфоструктурные особенности территории, которые не выделялись ранее ни при геологической съемке масштаба 1 : 200 000, ни при геоморфологическом анализе топографических бумажных карт. Интересным является факт выраженности на обзорных ДДЗЗ гляциокомплекса средненеоп-

лейстоценового возраста, погребенного под верхнечетвертичными озерными осадками, что не фиксируется непосредственно на современной земной поверхности, но подтверждается данными по редким обнажениям в бортах рек [5]. Отчленились друг от друга по морфометрическим и спектральным характеристикам коллювиальные комплексы эрозионных останцов на днище и средне-пологих склонов на бортах котловины; пологие делювиально-пролювиальные шлейфы; гляциокомплексы, аллювиальные и озерные равнины.

При переходе на среднемасштабный уровень исследований некоторые геолого-геоморфологические объекты, выделенные как однородные области по морфометрическим и спектральным характеристикам на ДДЗЗ мелкого пространственного разрешения, приобрели гетерогенный характер. Так, ПТК пустынных и опустыненных степей на литоземах на песчано-каменистом лимнии на моренном цоколе, имевший на мелкомасштабном уровне северо-восточные азимуты падения, при переходе на среднемасштабный уровень распался на мозаику эталонных площадок северо-восточной и восточной экспозиции. Такая пестрота элементарных площадок пологой озерной равнины обусловлена унаследованностью погребенного ледникового палеорельефа, позднее выровненного озерной деятельностью. Соседний к востоку озерный ПТК распался на мозаику плоских элементарных площадок и площадок северной, северо-западной, северо-восточной экспозиции; при этом существенную роль наряду со склонами от  $0,5$  до  $0,8^{\circ}$  стали играть пологие элементарные площадки с углами от  $0$  до  $0,5^{\circ}$ .

Другим примером гетерогенного ПТК на среднемасштабном уровне является аллювиальный комплекс (рисунок 2Б, здесь каналы датчика Landsat приведены в соответствие с каналами датчика MODIS). На космоснимках Landsat четко выделились спектральные кривые руслового аллювия, поймы, высокой поймы и первой террасы. На рисунке 2Б видно, что спектральная кривая руслового аллювия, представленного галечниками, значительно отличается от спектров пойменных участков с луговой и кустарниковой растительностью. При этом пойма и высокая пойма различаются между собой только в 6 и 7 каналах (средняя инфракрасная часть электромагнитного спектра). Спектральная кривая первой террасы по форме сходна с кривыми пойменных участков, однако она обладает более высокой отражательной способностью во всех каналах, кроме 2 (ближний инфракрасный диапазон). На ЦМР аллювиальная долина представлена на мелкомасштабном уровне крупным выделом северо-западного простирания, при этом в северной ее части выделяются области западного простирания ограничивающие древнюю долину. На среднемасштабном уровне северная часть распадается на мозаику плоских площадок и площадок северо-западного, западного и частично восточного направления; к югу доля западных и плоских площадок становится значительно меньше, и здесь преобладают северо-западное направление площадок. По углам падения склонов наблюдается сочетание пологих площадок со склонами от  $0,5$  до  $0,8^{\circ}$ , с более крутыми площадками с углами до  $2^{\circ}$ , разделение на северную и южную часть долины здесь не выражено. Таким образом, на уровне среднемасштабного пространственного разрешения, также как и на обзорном, по комбинаторике морфометрических признаков более молодая северо-западная часть долины р. Чуя отчетливо отделяется от юго-восточной. Эта граница также проявлена и на космических снимках линейной границей пойменного аллювия. Сопряженный анализ морфометрических и спектральных характеристик позволил выявить некоторые, скрытые до сих пор морфоструктурные особенности территории, а также зар картографировать наиболее типичные гомогенные и гетерогенные комплексы четвертичных отложений и рельефа.

## Заключение

В результате проведенных исследований разработана комплексная технология картографирования геолого-геоморфологических объектов на основе обработки ДДЗЗ, которая может быть использована как для составления схем геолого-геоморфологической основы ландшафта, так и для морфоструктурных геоморфологических карт, а также для карт четвертичных отложений. Оригинальными компонентами новой методики являются сопряженный анализ ЦМР и мультиспектральных космоснимков мелкомасштабного и среднемасштабного пространственного разрешения, использование плотностных сеток для оконтуривания границ распространения гетерогенных полигенетических комплексов четвертичных отложений и рельефа. Использование баз геоданных с унифицированным междисциплинарным описанием эталонных участков (рельеф, геология, почвы, растительность) позволяет верифицировать результаты обработки ДДЗЗ. Разработанная технология позволяет выявлять морфоструктурные и морфоскульптурные особенности геолого-геоморфологического строения территории, которые не фиксируются на топокартах и натурными наблюдениями на дневной поверхности.

## Литература

1. Добрецов Н.Н., Зольников И.Д., Королюк А.Ю., Мистрюков А.А., Смоленцев Б.А., Смоленцева Е.Н., Мартысевич У.В., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Разработка системы комплексного описания полигонов для интерпретации данных космической съемки // Сибирский экологический журнал. - 2005. - № 6. - С. 1031-1038.
2. Зольников И.Д., Смоленцева Е.Н., Королюк А.Ю., Лямина В.А., Мартысевич У.В., Добрецов Н.Н. Многопараметрические базы геоданных для картографирования и мониторинга наземных экосистем Чуйской котловины Горного Алтая // Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее. Мат. Международной конф. (22-26 сентября 2008 года г. Горноалтайск). Горно-Алтайск, 2008. С. 67-72.
3. Девяткин Е.Н. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая, тр. ГИН, Вып. 126, М.: Наука, 1965,-243 с.
4. Новиков И.С. Морфотектоника Алтая, Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2004, 313 с.
5. Зольников И.Д., Деев Е.В., Лямина В.А. Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2010, т.51, №4, С.437-449.



# Using GIS and RS for mapping og geology-geomorphological objects of Chuya hollow by space images of middle resolution

I.D. Zolnikov <sup>1,2</sup>, N.V. Glushkova <sup>1</sup>, V.A. Lyamina <sup>1,2</sup>, E.N. Smolentceva <sup>3</sup>, A.Yu. Korolyuk <sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of geology and mineralogy SB RAS,  
630090 Novosibirsk, Koptug prospect, 3  
zol@uiggm.nsc.ru;*

<sup>2</sup>*Novosibirsk state university,*

*630090 Novosibirsk, Pirigova str. 2.*

<sup>3</sup>*Institute of soil and agrochemistry SB RAS,  
630099 Novosibirsk, Sovetskaya str. 18.*

*smolentseva@issa.nsc.ru*

<sup>4</sup>*Central Siberian botanic garde SB RAS  
630090 Novosibirsk, Zolotodolinskaya str. 101.*

*akoroluk@csbg.nsc.ru.*

The article is devoted to using of space images of MODIS, Landsat, and also the digital elevation models on the base of SRTM data for mapping of quaternary deposits and relief on the example of Ghuya hollow in Gorny Altai. The complex Gis and RS technology, including development and creation of multidisciplinary geodatabases with the characteristics of relief, geology, soils and vegetation of typical natural-territorial complexes is considered. For revealing the areas of distribution and extents of heterogeneous geology-geomorphologic contours of polygenetic nature, the construction of density maps was applied. Analysis of spectral characteristics of mapping objects is conducted on low and middle levels of spatial resolution, that allows to reveal regularities of generalization of spectral and morphometrical characteristics. The developed complex technology allows to reveal such geology-geomorphologic regularities, which not always fixes by natural investigation on the Earth surface.

**Key words:** GIS, DEM, MODIS, Landsat, relief, quaternary geology.