

УДК: 528.873.041.3

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-496-507

М.Ю. Грищенко<sup>1</sup>, Д.А. Лучер<sup>2</sup>, М.В. Бочарников<sup>3</sup>

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ТЕПЛОВЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО УРАЛА И КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты дешифрирования растительного покрова по многовременным тепловым космическим снимкам двух горно-степных участков: на Южном Урале (Абзелиловский район Республики Башкортостан) и в Кузнецком Алатау (Усть-Абаканский и Ширинский районы Республики Хакасии). По этим участкам есть большой объем полевых данных о растительном покрове, что позволяет проводить надежную верификацию спутниковых данных. На основе полевых данных и снимков высокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне составлены карты растительности, которые стали основой для дальнейшего дешифрирования тепловых снимков – использованы снимки съемочной системы TIRS, спутник Landsat 8. К многовременным снимкам применены методы контролируемой и неконтролируемой классификации. В ходе исследования удалось установить, что по результатам дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам для участка на Южном Урале можно с хорошей достоверностью (до 50–70 %) определять лесные территории, уверенно проводить границу леса и безлесных территорий. С удовлетворительной точностью (до 44 %) определяются петрофитные степи. Для участка на Южном Урале характерны небольшие размеры территории, малое разнообразие растительных сообществ и достаточно большая зависимость интенсивности теплового излучения от экспозиции склонов. Участок в Кузнецком Алатау показал более репрезентативные результаты дешифрирования. Наиболее уверенно распознаются лиственничные и березово-лиственничные леса (до 70 %), пихтовые и березово-пихтовые леса (до 56 %), ерниковые и мохово-лишайниковые тундры (до 49 %), степная растительность (до 45 %).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** географическое дешифрирование, Landsat, контролируемая классификация, неконтролируемая классификация, Южный Урал, Кузнецкий Алатау

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, 1, 119991, Москва, Россия / Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ФГиГТ, Покровский бульвар, 11, 109028, Москва, Россия, *e-mail*: [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [denis.lucher@gmail.com](mailto:denis.lucher@gmail.com)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские Горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [maxim-msu-bg@mail.ru](mailto:maxim-msu-bg@mail.ru)

**Mikhail Y. Grishchenko<sup>1</sup>, Denis A. Lucher<sup>2</sup>, Maxim V. Bocharnikov<sup>3</sup>**

**EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF VEGETATION  
INTERPRETATION ON THERMAL INFRARED SATELLITE IMAGES,  
CASE OF THE SOUTHERN URALS AND KUZNETSK ALATAU**

**ABSTRACT**

The paper presents the results of the vegetation cover interpretation using multitemporal thermal satellite images of two mountain-steppe areas: in the Southern Urals (Abzelilovsky district of the Republic of Bashkortostan) and in Kuznetsk Alatau (Ust-Abakansky and Shirinsky districts of the Republic of Khakassia). These areas have a large amount of field data on vegetation, which allows for reliable verification of satellite data. On the basis of field data and images of high spatial resolution in the optical range, vegetation maps were compiled, which became the basis for further interpretation of thermal images – images of the TIRS sensor, Landsat 8 satellite, were used. Methods of controlled and uncontrolled classification were applied to multitemporal images. In the course of the study, it was possible to establish that, based on the results of vegetation interpretation using thermal satellite images for a site in the South Urals, it is possible to determine forest areas with good reliability (up to 50–70 %), and confidently draw the border between forest and treeless areas. With satisfactory accuracy (up to 44 %), petrophytic steppes are determined. The site in the Southern Urals is characterized by a small size of the territory, a low diversity of plant communities, and rather a large dependence of the intensity of thermal radiation on the exposure of slopes. The site in Kuznetsk Alatau showed more representative interpretation results. Larch and birch-larch forests (up to 70 %), fir and birch-fir forests (up to 56 %), dwarf birch and moss-lichen tundras (up to 49 %), and steppe vegetation (up to 45 %) are most confidently recognized.

**KEYWORDS:** geographical imagery interpretation, Landsat, supervised classification, unsupervised classification, South Urals, Kuznetsk Alatau

**ВВЕДЕНИЕ**

Тепловая съемка широко используется для изучения и мониторинга как природных, так и антропогенных объектов. Например, тепловые снимки применяются при определении тектонических линеаментов, при поиске полезных ископаемых, для мониторинга нефте- и газопроводов, изучения городских территорий.

Одним из самых репрезентативных, с точки зрения дешифрирования, компонентов геосистем является растительность. В большинстве случаев она изучается по снимкам в видимом и ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах. В представленной работе растительность рассмотрена в аспекте дешифрирования по тепловым снимкам.

Тепловые космические снимки используются в науках о Земле с 60-х гг. XX века. Наиболее изученными являются геосистемы глобального уровня, информация о которых извлекается со снимков низкого пространственного разрешения. Исследования геосистем регионального уровня развиты существенно меньше. Различные виды растительного покрова имеют разные тепловые и излучательные свойства, проявляющиеся на тепловых космических снимках, следовательно, их использование для дешифрирования растительного покрова является перспективным направлением. При использовании тепловой съемки и синхронной с ней съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах можно различать участки с

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia / HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Pokrovsky Blvd., 11, 109028, Moscow, Russia, e-mail: [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [denis.lucher@gmail.com](mailto:denis.lucher@gmail.com)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [maxim-msu-bg@mail.ru](mailto:maxim-msu-bg@mail.ru)

лесной растительностью и без нее, участки, поросшие кустарниками [Кронберг, 1988]. Для дешифрирования растительности тепловые космические снимки используются реже, чем снимки в оптическом (видимом и ближнем инфракрасном) диапазоне. Однако по тепловым снимкам могут быть выявлены некоторые особенности, которые не находят отражение на снимках в других частях спектра. Растительность хорошо дешифрируется при ее изучении в период активной вегетации за счет накопления влаги и транспирации: во время испарения и транспирации происходит снижение интенсивности теплового излучения и формируются тепловые минимумы [Srivastava et al., 2009]. В холодное время года растительность также излучает и поглощает тепло, что отражается на тепловых снимках.

Дешифрирование растительности на уровне геосистем лучше всего проводить с помощью снимков с ресурсных спутников [Rodriguez-Galiano et al., 2012]. Программа Landsat является наиболее длительной, в рамках нее можно работать со снимками съемочных систем TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), TIRS (Thermal Infrared Sensor).

Для исследования растительного покрова можно применять контролируемую классификацию. Для ее проведения необходимо использовать эталонные участки, на территории которых имеются геоботанические описания. Чтобы сравнить результаты классификации, используются пары многозональных снимков с участием теплового канала (красный, ближний инфракрасный (БИК) и тепловой каналы) и без его участия (красный, БИК и средний инфракрасный) [Грищенко, Буторина, 2017].

При использовании неконтролируемой классификации многозональных или многовременных снимков, как правило, создается серия результатов классификации с разным итоговым количеством кластеров. Из полученных вариантов следует выбрать оптимальный таким образом, чтобы он был интерпретируемым, и при этом содержал максимум информации о пространственной дифференциации объектов земной поверхности [Грищенко, Калитка, 2019].

Ранее проведенные исследования авторов свидетельствуют о том, что объекты, которые в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне имеют схожие характеристики, лучше дешифрируются при использовании информации об интенсивности теплового излучения. На многозональных снимках с тепловым каналом, полученных в периоды с устойчивым снежным покровом, наиболее достоверно дешифрируется древесная растительность. Выявлены преимущества многозональных снимков с участием теплового канала для дешифрирования сообществ кедрового стланика и лиственных лесов [Грищенко, Буторина, 2017]. При этом лиственные леса можно дешифрировать не только в периоды активной вегетации, но и в холодное время года. Эффективно использование теплового канала и для дешифрирования кустарничковых тундр, а также для выделения пойменной растительности, в частности ивняков [Грищенко, Буторина, 2017].

Для дешифрирования растительности используются методы, в рамках которых проводят контролируемую классификацию многозональных, в том числе тепловых, данных [Hansen et al., 2002]. Для обучающей выборки используются только однородные характерные участки. В обозначенном подходе, кроме однородных участков, рассматриваются частные случаи. Например, при создании выборки для леса, в выборку попадают пиксели, отображающие участки как сплошного, так и разреженного лесного покрова. В настоящее время тепловые космические снимки не нашли широкого применения для изучения растительного покрова. Вместе с тем, можно выделить круг научных работ, посвященных картографированию и оценке растительного покрова засушливых регионов мира, в которых тепловым космическим снимкам уделено особое внимание [Southworth, 2004; Sinha et al., 2015; Alshaikh, 2015; Neinavaz et al., 2021].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является анализ возможностей дешифрирования растительности и ее характеристик на базе только тепловых космических снимков. Важными условиями отбора ключевых участков для дешифрирования являются наличие подробных полевых

описаний растительного покрова и многообразие растительных сообществ. Этим условиям удовлетворяют участки на Южном Урале и в Кузнецком Алатау, в пределах которых один из авторов проводил полевые обследования растительного покрова.

Участок на Южном Урале имеет размеры  $3,7 \times 3,0$  км и находится на границе лесных и степных ландшафтов. Здесь встречаются растительные сообщества, осложненные каменистыми образованиями. Для территории характерен сопочный рельеф, оказывающий влияние на освещенность местности, распределение влаги и химических веществ. Все это приводит к значительной дифференциации растительного покрова.

Для Кузнецкого Алатау (участок существенно больше,  $51 \times 45$  км) ключевую роль играет высотная поясность. Растительность подразделена на пять основных поясов: высокогорный, таежный, подтаежный, лесостепной, степной. Для территории характерно наличие степей, мелколиственных, светлохвойных и темнохвойных лесов, тундровых формаций.

Очевидно, что на обоих изучаемых участках можно сравнить аналогичные растительные формации. Так, на обеих территориях имеются степные и мелколиственные сообщества. Таким образом, важно отметить, что двум изучаемым участкам свойственны не только принципиальные различия с точки зрения состава и свойств растительных сообществ, но и существенные сходства.

По результатам полевых работ составлены сводные таблицы геоботанических описаний. Для участка на Южном Урале описания датируются августом 2016 г., для Кузнецкого Алатау – июнем 2008 г. и июнем-июлем 2009 г. Таким образом, структурирована информация о встречаемых на участках типах растительности для каждой из точек маршрутов. На основе структурированных геоботанических описаний и космических снимков со спутника SPOT-4 составлены две карты растительности (рис. 1–2). Они выступали в качестве эталонных изображений, отображающих пространственную неоднородность растительного покрова.

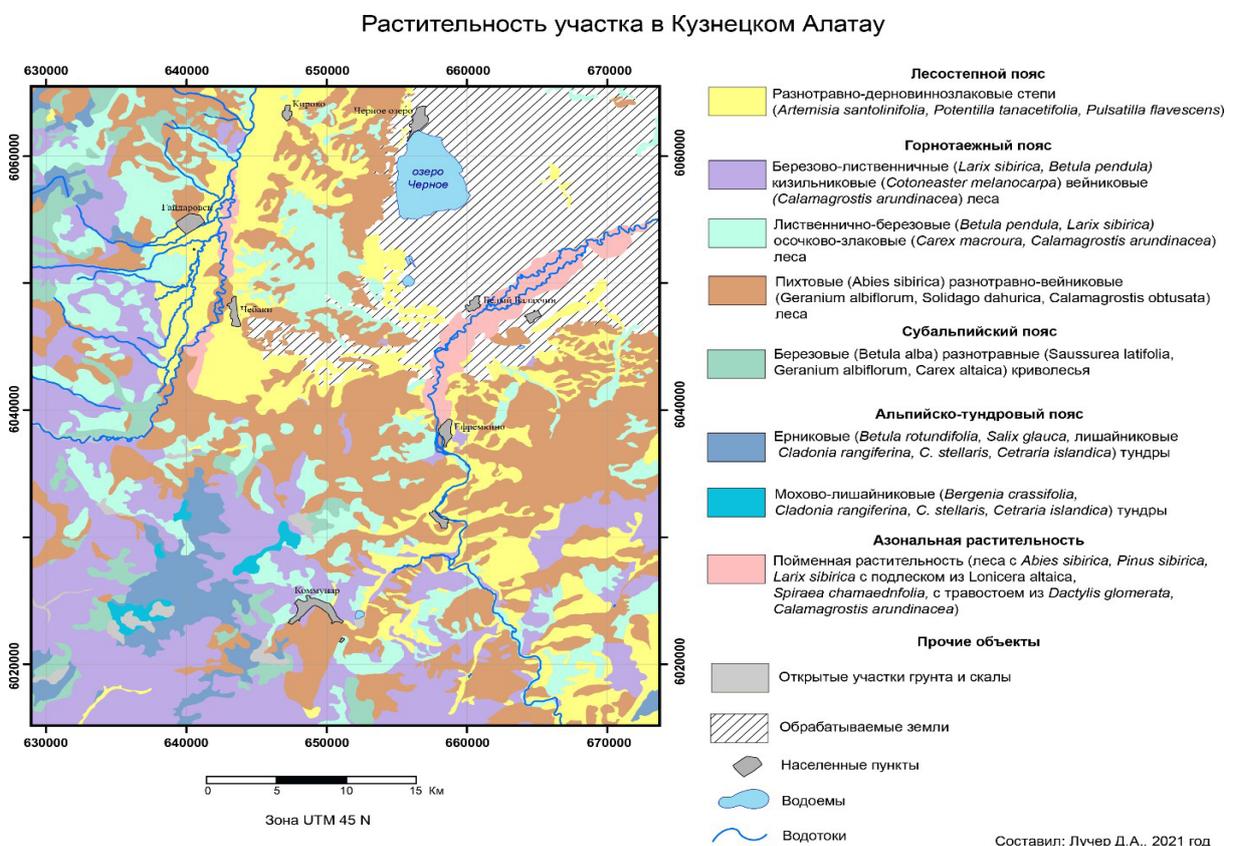


Рис. 1. Карта растительности участка в Кузнецком Алатау.  
Fig. 1. Vegetation map for the site in Kuznetsk Alatau.

Растительность участка на Южном Урале

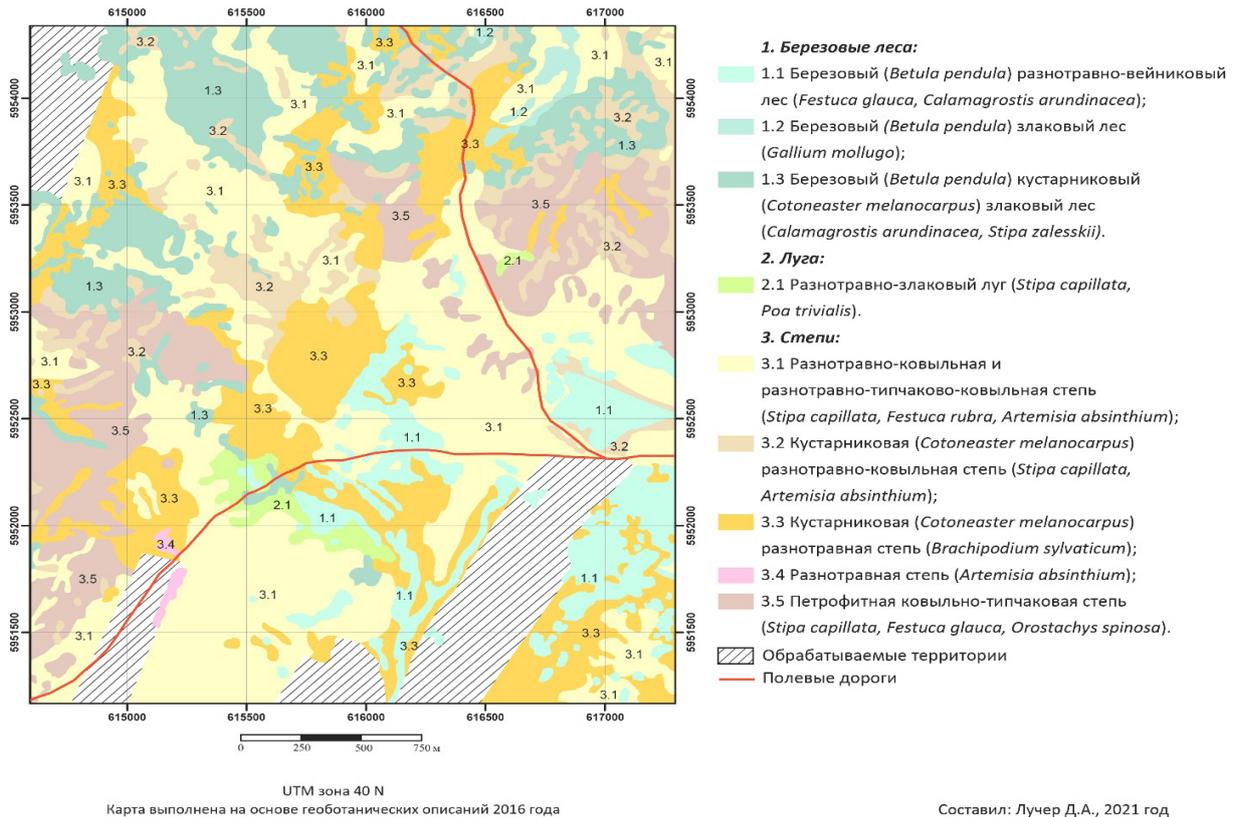


Рис. 2. Карта растительности участка на Южном Урале.  
 Fig. 2. Vegetation map for the site in South Urals.

Для дальнейшей работы выбраны тепловые космические снимки со спутника Landsat 8, находящиеся в открытом доступе. Эти снимки послужили исходным материалом для дешифрирования растительности. Высокой информативностью с точки зрения дешифрирования характеризуются разносезонные снимки [Книжников, 1985; Книжников, Кравцова, 1991]. В связи с этим решено сделать акцент на учет сезонной изменчивости теплового поля и проявляющихся в этой изменчивости характеристик.

Для снимков выдвинуты следующие критерии, по которым проведен их отбор:

- а) космические снимки должны полностью покрывать исследуемую территорию;
- б) на снимках не должно быть облачности, которая препятствует дешифрированию изучаемой территории;
- в) космические снимки должны охватывать все сезоны года для наиболее полного анализа возможностей дешифрирования растительности в тепловом диапазоне;
- г) год получения снимков должен соответствовать году получения геоботанических описаний – для изучаемой территории на Южном Урале геоботанические описания были сделаны в августе 2016 г., а для Кузнецкого Алатау – в июне 2008 г. и в июне-июле 2009 г.

Для участка на Южном Урале несложно найти снимки, удовлетворяющие всем критериям. Отобраны снимки за следующие даты:

- 30 января 2017 г.;
- 16 марта 2016 г.;
- 26 апреля 2016 г.;
- 12 мая 2016 г.;
- 16 августа 2016 г.;
- 1 сентября 2016 г.;
- 30 ноября 2017 г.;
- 16 декабря 2017 г.

Для территории в Кузнецком Алатау не удалось найти снимков, удовлетворяющих временному критерию – снимки со спутника Landsat 5, полученные летом 2008 и 2009 гг., оказались неподходящими. Тем не менее, важно сказать, что участок в Кузнецком Алатау достаточно крупный (51 × 45 км, масштаб карты растительности 1:300 000), и мы рассматриваем территорию, которая практически не изменилась с 2008 г., тем более в таком масштабе. Ввиду более высокого радиометрического разрешения (16 бит) снимков со спутника Landsat 8, было решено использовать их. Отобраны снимки за следующие даты:

16 января 2016 г.;  
 19 февраля 2017 г.;  
 29 марта 2019 г.;  
 24 апреля 2017 г.;  
 9 мая 2020 г.;  
 18 июня 2017 г.;  
 14 сентября 2020 г.;  
 28 октября 2015 г.;  
 26 ноября 2020 г.;  
 28 декабря 2020 г.

Обработка снимков произведена в ПО ArcGIS 10.5. Отобранные снимки уровня обработки L1 (портал EarthExplorer, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) были предварительно подготовлены к дальнейшей обработке: осуществлено выделение изучаемой территории из исходных сцен, а затем проведено вычисление спектральной плотности по тепловым каналам. Все подготовленные изображения были совмещены в один многовременной всесезонный снимок (для каждой территории). Таким образом, получены основные многовременные снимки для Южного Урала и Кузнецкого Алатау. Кроме того, для Южного Урала дополнительно были составлены еще 4 многовременных снимка:

- а) ноябрь–декабрь–январь – для анализа растительности в период отсутствия вегетации и с устойчивым снежным покровом;
- б) май–август–сентябрь – можно получить информацию о состоянии растительности в активный вегетационный период;
- в) январь–март–апрель – для анализа динамики растительности через переход от холодного времени года к периоду с активной вегетацией;
- г) август–сентябрь–ноябрь – для получения информации об изменениях растительности во время перехода от активной вегетации к холодному периоду.

Снимки были обработаны методами неконтролируемой и контролируемой классификации.

Неконтролируемая классификация (или кластеризация) представляет собой разбиение некоторого множества пикселей на группы, кластеры в пространстве признаков. Кластеризация отличается от контролируемой классификации тем, что для нее изначально не задается перечень групп с выборкой объектов, входящих в эти группы. В нашей работе использован наиболее распространенный метод ISODATA. Для участков на Южном Урале и в Кузнецком Алатау получены варианты результатов неконтролируемой классификации с выделением от 3 до 19 выделяемых кластеров. Затем из всех полученных вариантов неконтролируемой классификации следует выбрать оптимальный. Для этого можно для полученных вариантов результатов неконтролируемой классификации вычислить коэффициент различия графиков временных образов. Вычисляется разность между средними значениями ближайших по интенсивности излучения классов многовременных снимков. Сначала требуется упорядочить все значения интенсивности теплового излучения от большего к меньшему для каждого отдельного снимка в рамках многовременного. На следующем шаге для каждого снимка рассчитана разность этих значений [Грищенко, Калитка, 2019]. Расчеты представлены на рис. 3 и 5.

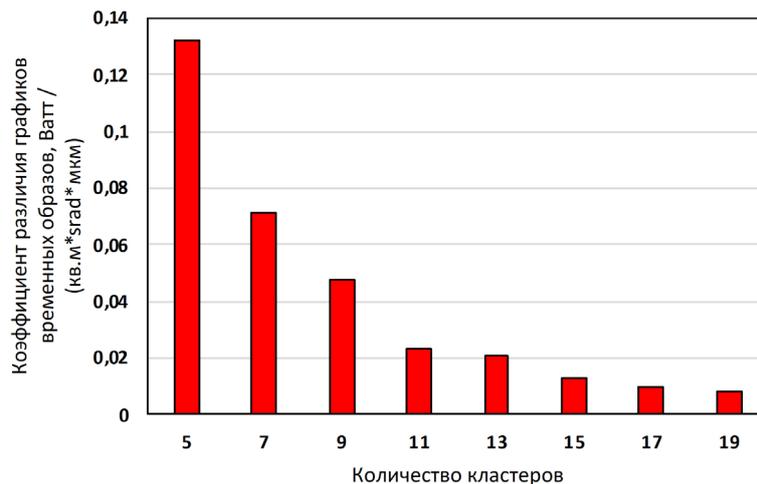


Рис. 3. Коэффициенты различия графиков временных образов для многовременного снимка на Кузнецкий Алатау.  
 Fig. 3. Difference coefficients of temporal image graphs for a multi-temporal image on Kuznetsk Alatau

Как видно из диаграмм, этот коэффициент практически идентичен при выделении 11 или 13 классов, после чего скачкообразно меняется при переходе к 15 классам, затем снова изменяется плавно. Это позволяет сделать предположение, что общая информативность результата неконтролируемой классификации является максимальной при выделении 13 классов и впоследствии существенно не изменяется. Таким образом, оптимальным результатом неконтролируемой классификации является результат с 13 классами (рис. 4).

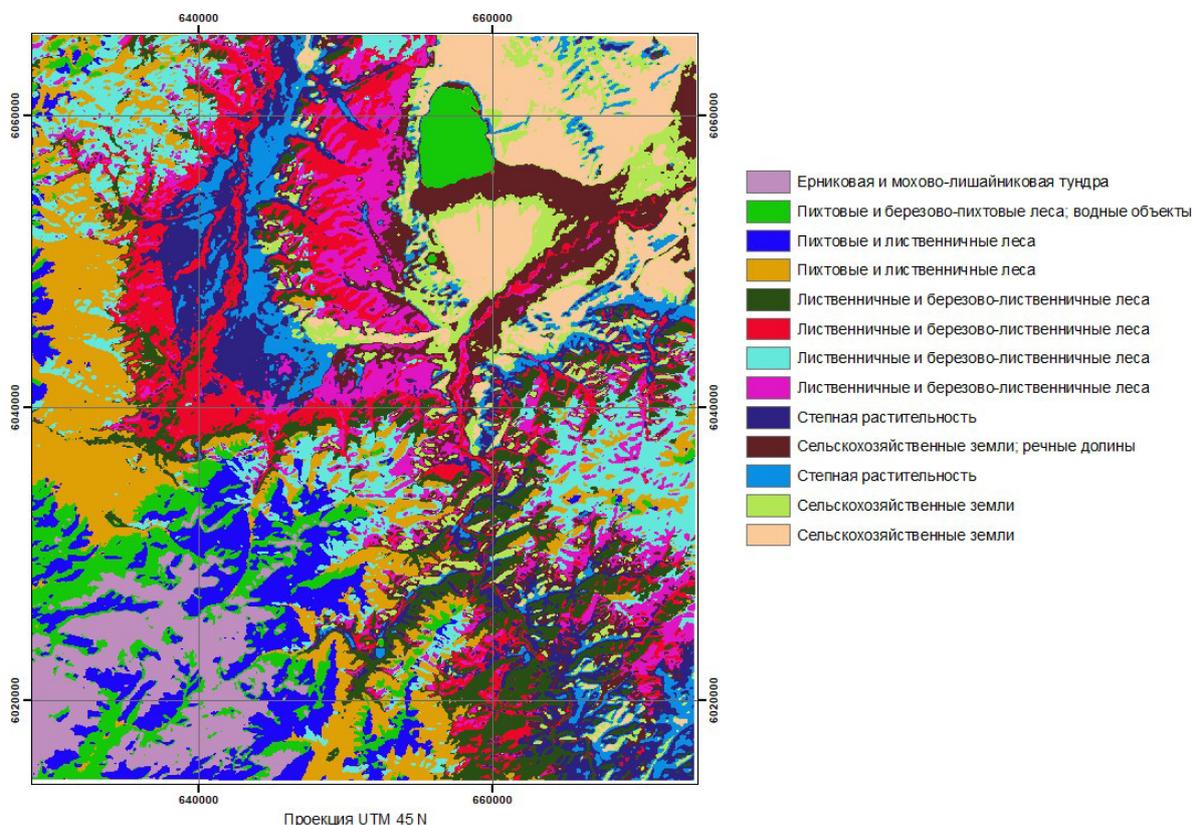


Рис. 4. Результат неконтролируемой классификации основного многовременного снимка для Кузнецкого Алатау (13 классов).  
 Fig. 4. The result of unsupervised classification of the main multitemporal image for the Kuznetsk Alatau (13 classes).

Аналогично участку в Кузнецком Алатау, проведены расчеты для территории на Южном Урале (рис. 5). Оптимальным оказался вариант неконтролируемой классификации с 7 классами (рис. 6).

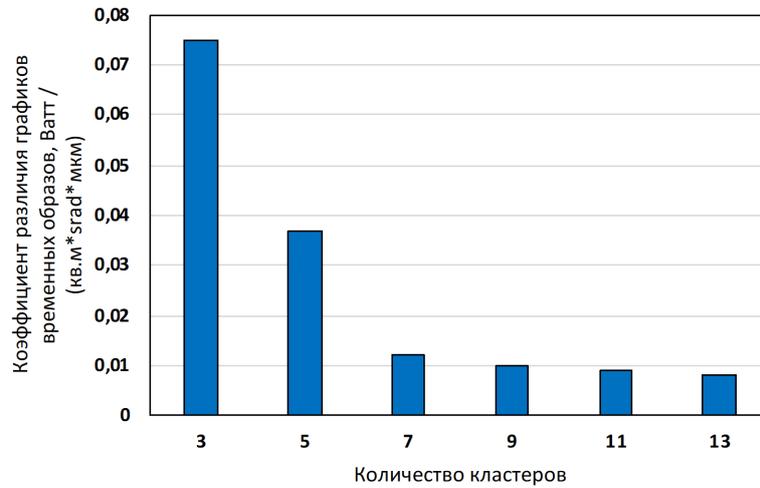


Рис. 5. Коэффициенты различия графиков временных образов для многовременного снимка для Южного Урала.

Fig. 5. Difference coefficients of temporal image graphs for a multitemporal image for the Southern Urals.

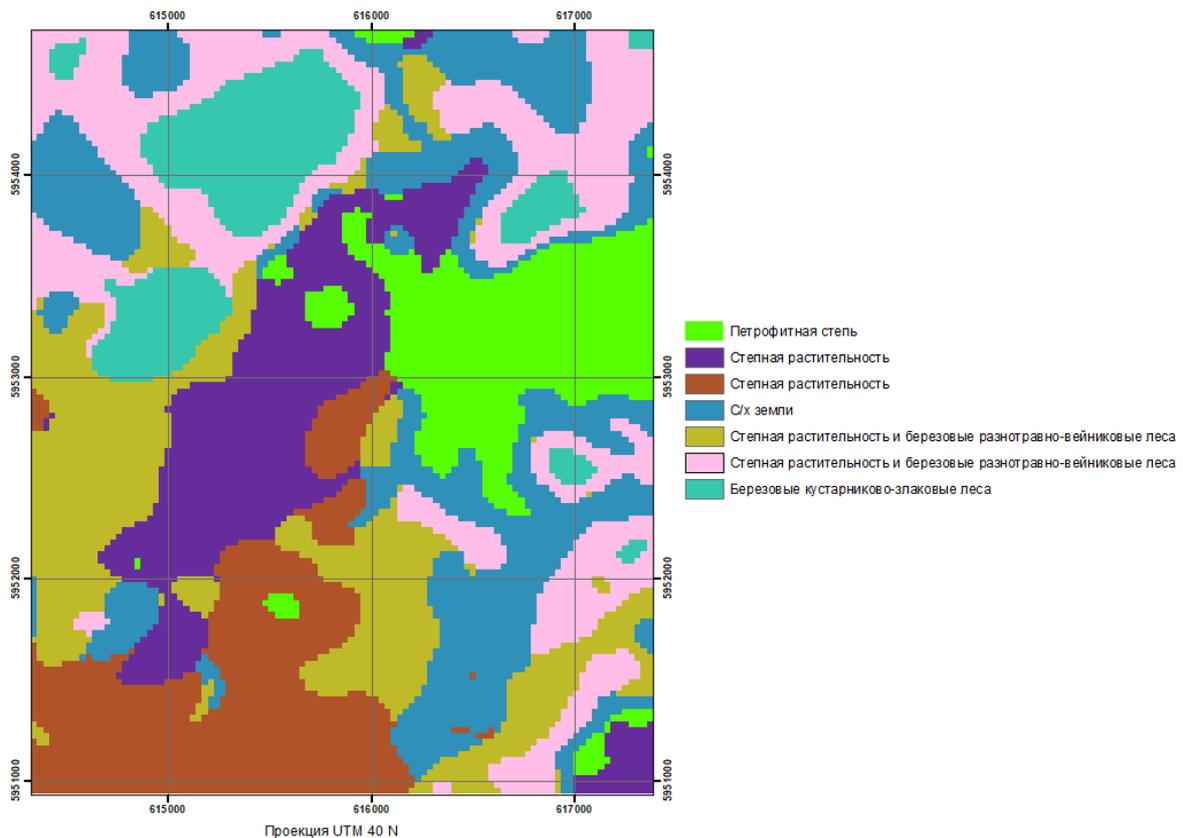


Рис. 6. Результат неконтролируемой классификации основного многовременного снимка для Южного Урала (7 классов).

Fig. 6. The result of unsupervised classification of the main multitemporal image for the Southern Urals (7 classes).

Контролируемая классификация снимка представляет собой группу методов, с помощью которой происходит разделение объектов на некоторые группы при помощи

обучающей выборки. Обучающая выборка состоит из образцов известных объектов, отнесенных к разным классам. Как правило, обучающая выборка формируется вручную, и выделяемые объекты при этом относят к известным классам. Для решения нашей задачи использован метод максимального правдоподобия. Эталонные участки выделялись по многовременным снимкам со спутника Landsat 8 на основе созданных ранее карт растительности.

Для Южного Урала выделено 4 класса объектов: разнотравные степи; обрабатываемые сельскохозяйственные земли; петрофитная ковыльно-типчаковая степь; березовые леса.

Для Кузнецкого Алатау выделены следующие классы объектов: степная растительность; пихтовые и березово-пихтовые леса; лиственничные и березово-лиственничные леса; тундровая растительность; открытые участки грунта и скалы; водные объекты; сельскохозяйственные объекты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя результаты неконтролируемой классификации, можно заметить, что этот метод оказался более эффективным для участка в Кузнецком Алатау. Это можно объяснить большим территориальным охватом ( $51 \times 45$  км), который лучше соотносится с пространственным разрешением снимков со спутника Landsat 8 в тепловом диапазоне (100 м) и разнообразием растительных сообществ, связанным, прежде всего, с высотной поясностью. В зависимости от количества выделяемых кластеров по тепловым космическим снимкам возможно дешифровать водные объекты, тундры, различать типы лесной растительности, выделять переходную зону между степями и лесами, определять растительность долин рек, отличать степную растительность от сельскохозяйственных территорий.

Для участка на Южном Урале неконтролируемая классификация оказалась менее показательной: с помощью этого метода можно отличать лесную растительность от степной и определять сельскохозяйственные территории. Такие результаты могут быть связаны с небольшими размерами выбранного участка ( $3,7 \times 3,0$  км), малым разнообразием растительных сообществ и достаточно большой зависимостью теплового излучения от экспозиции склонов.

Для участка на Южном Урале проведена классификация всепогодного многовременного снимка, а также для отдельных сезонов: для теплого и холодного сезонов, для переходных периодов. По результатам контролируемой классификации наиболее уверенно распознаются березовые леса. Особенно интересно отметить выделение крупных массивов в северо-западной и восточной частях снимка. Лучше всего массивы леса распознаются по результатам классификации основного многовременного снимка, где доля верно дешифрованных лесов составляет 55–60 %.

В ходе исследования выявлено, что по тепловым снимкам возможно выделять петрофитные степи. Лучше всего это удастся сделать с помощью классификации по многовременному снимку январь–март–апрель. Значение спектральной плотности у петрофитной степи в январе и марте в среднем больше, чем у других классов. Это может быть связано прежде всего с тем, что петрофитные участки расположены на склонах южной экспозиции. Суммарная доля правильно дешифрованных петрофитных степей по результатам классификации этого многовременного снимка составляет 35–40 %.

При определении кустарниковых степей результаты классификации являются неубедительными. Спектральные характеристики кустарниковых степей располагаются в очень широком диапазоне и пересекаются со всеми остальными классами.

Нельзя говорить о достоверном дешифрировании и в случае с сельскохозяйственными полями. По результатам контролируемой классификации основного многовременного снимка этот класс определяется только в пределах одного контура. Доля верно определенных сельскохозяйственных участков составляет всего около 20 % от их общей площади.

Контролируемая классификация космического снимка для участка в Кузнецком Алатау позволяет достаточно точно определять границы степной растительности. Тем

не менее, некоторые участки, относящиеся к степи, попадают в один класс с сельскохозяйственными угодьями. Переходные участки от степи к лесу могут попадать в класс со степями либо с лиственничными лесами. Некоторые участки степей попадают в другие выделяемые классы.

Кроме того, по результатам контролируемой классификации уверенно определяются пихтовые и лиственничные леса. Однако не всегда с помощью этого метода возможно в точности определить породный состав леса: часть лиственничных и березово-лиственничных лесов попадает в кластер с пихтовыми лесами и наоборот.

Самые репрезентативные результаты контролируемой классификации получены для горно-тундровой растительности. Доля верно дешифрованных горных тундр составляет 45–50 %.

Если говорить о прочих объектах, то по результатам контролируемой классификации хорошо определяются скалы, участки открытого грунта, водные объекты, достоверность определения которых составляет до 80–90 %.

## ВЫВОДЫ

В ходе исследования удалось установить, что по результатам дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам для участка на Южном Урале можно с хорошей достоверностью (до 50–70 %) определять лесные территории, уверенно проводить границу леса и безлесных территорий. С удовлетворительной точностью (до 44 %) определяются петрофитные степи. Для участка на Южном Урале характерны небольшие размеры территории, малое разнообразие растительных сообществ и достаточно большая зависимость интенсивности теплового излучения от экспозиции склонов. Это обуславливает большое смещение интенсивности теплового излучения для различных растительных сообществ, что отрицательно сказывается на результатах дешифрирования.

Участок в Кузнецком Алатау показал более репрезентативные результаты дешифрирования. Наиболее уверенно распознаются лиственничные и березово-лиственничные леса (до 70 %), пихтовые и березово-пихтовые леса (до 56 %), ерниковые и мохово-лишайниковые тундры (до 49 %), степная растительность (до 45 %). Изучаемый участок в Кузнецком Алатау характеризуется большими размерами и большим разнообразием растительных сообществ, которое, в частности, можно объяснить наличием высотной поясности. Это находит свое отражение и в пространственно-временной изменчивости теплового излучения.

Таким образом, выявлены возможности и ограничения дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам, рассмотрены различные варианты многовременных снимков и их обработки. В дальнейшем это может послужить основой для создания полноценной методики дешифрирования растительности по тепловым космическим снимкам.

Следует отметить, что использование тепловых космических снимков для дешифрирования растительности является перспективным направлением, и весь спектр методов, которые можно применить, невозможно охватить в рамках одной работы. Помимо составленных многовременных снимков можно использовать другие варианты. Например, подробнее рассмотреть внутрисезонный и межсезонный варианты многовременных снимков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко М.Ю., Буторина С.А. Исследование возможностей применения тепловых снимков для дешифрирования растительности (на примере островов Беринга и Кунашир). Материалы Международной конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2017. Т. 23. № 3. С. 71–81. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-71-81.
2. Грищенко М.Ю., Калитка Л.С. Изучение сезонной изменчивости теплового поля Краснодарского края по космическим снимкам со спутника Landsat 8. Материалы Международной

конференции ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2019. Т. 25. № 2. С. 101–111. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111.

3. *Книжников Ю.Ф.* Динамическое аэрокосмическое зондирование (содержание, проблемы, область применения). Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1985. № 4. С. 7–14.

4. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И.* Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. М.: Изд-во МГУ, 1991. 206 с.

5. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.

6. *Alshaikh A.* Vegetation Cover Density and Land Surface Temperature Interrelationship Using Satellite Data, Case Study of Wadi Bisha, South KSA. *Advances in Remote Sensing*, 2015. V. 4. No. 3 P. 248–262. DOI: 10.4236/ars.2015.43020.

7. *Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R.G., Sohlberg R., Dimiceli C., Carroll M.* Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002. V. 83. Issues 1–2. P. 303–319. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00079-2.

8. *Neinavaz E., Schlerf M., Darvishzadeh R., Gerhards M., Skidmore A.K.* Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021. V. 102. P. 102415. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102415.

9. *Rodriguez-Galiano V., Pardo-Iguzquiza E., Sanchez-Castillo M., Chica-Olmo M., Chica-Rivas M.* Downscaling Landsat 7 ETM+ thermal imagery using land surface temperature and NDVI images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. V. 18. P. 515–527. DOI: 10.1016/j.jag.2011.10.002.

10. *Sinha S., Sharma L.K., Nathawat M.S.* Improved Land-use/Land-cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015. V. 18. Issue 2. P. 217–233. DOI: 10.1016/J.EJRS.2015.09.005.

11. *Southworth J.* An assessment of Landsat TM band 6 thermal data for analysing land cover in tropical dry forest regions, *International Journal of Remote Sensing*, 2004. V. 25. No. 4. P. 689–706. DOI: 10.1080/0143116031000139917.

12. *Srivastava P.K., Majumdar T.J., Bhattacharya A.K.* Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat 7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 2009. V. 43. No. 10. P. 1563–1574. DOI: 10.1016/j.asr.2009.01.023.

## REFERENCES

1. *Alshaikh A.* Vegetation Cover Density and Land Surface Temperature Interrelationship Using Satellite Data, Case Study of Wadi Bisha, South KSA. *Advances in Remote Sensing*, 2015. V. 4. No. 3 P. 248–262. DOI: 10.4236/ars.2015.43020.

2. *Grishchenko M.Y., Butorina S.A.* Investigation of the possibilities of using thermal images for vegetation interpretation (case of the Bering and Kunashir Islands). *Proceedings of the International Conference InterCarto. InterGIS*, 2017. V. 23. No. 3. P. 71–81 (In Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-71-81.

3. *Grishchenko M.Y., Kalitka L.S.* Study of the seasonal variability of the Krasnodar thermal field based on images from the Landsat 8 satellite. *InterCarto. InterGIS*, 2019. V. 25. No. 2. P. 101–111 (In Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111.

4. *Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R.G., Sohlberg R., Dimiceli C., Carroll M.* Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002. V. 83. Issues 1–2. P. 303–319. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00079-2.

5. *Knizhnikov Y.F.* Dynamic aerospace sounding (content, problems, scope). *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 1985. No. 4. P. 7–14 (in Russian).

6. *Knizhnikov Y.F., Kravtsova V.I.* Aerospace research of the dynamics of geographical phenomena. Moscow: Moscow University Press. 1991. 206 p. (in Russian).
  7. *Kronberg P.* Remote study of the Earth: Fundamentals and methods of remote research in geology. Moscow: Mir. 1988. 343 p. (in Russian).
  8. *Neinavaz E., Schlerf M., Darvishzadeh R., Gerhards M., Skidmore A.K.* Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021. V. 102. P. 102415. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102415.
  9. *Rodriguez-Galiano V., Pardo-Iguzquiza E., Sanchez-Castillo M., Chica-Olmo M., Chica-Rivas M.* Downscaling Landsat 7 ETM+ thermal imagery using land surface temperature and NDVI images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. V. 18. P. 515–527. DOI: 10.1016/j.jag.2011.10.002.
  10. *Sinha S., Sharma L.K., Nathawat M.S.* Improved Land-use/Land-cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015. V. 18. Issue 2. P. 217–233. DOI: 10.1016/J.EJRS.2015.09.005.
  11. *Southworth J.* An assessment of Landsat TM band 6 thermal data for analysing land cover in tropical dry forest regions, *International Journal of Remote Sensing*, 2004. V. 25. No. 4. P. 689–706. DOI: 10.1080/0143116031000139917.
  12. *Srivastava P.K., Majumdar T.J., Bhattacharya A.K.* Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat 7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 2009. V. 43. No. 10. P. 1563–1574. DOI: 10.1016/j.asr.2009.01.023.
-