

УДК 551.345.1

ВЫДЕЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ЗОНЕ ИХ ОСТРОВНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО ТЕПЛОВЫМ КАНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ LANDSAT-7 ETM+

^{1,2}Борисов Б.З., ¹Фёдоров П.П., ¹Чикидов И.И., ^{1,3}Десяткин А.Р.

¹ФГБУН «Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН», Якутск, e-mail: bzborisov@mail.ru;

²ФГАОУ «Северо-Восточный федеральный университет», Якутск, e-mail: bzborisov@mail.ru;

³ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова», СО РАН, Якутск,
e-mail: desyatkinar@rambler.ru

В статье предложен способ выделения участков многолетнемерзлых пород (ММП) островного распространения по тепловым каналам спутника Landsat-7. Предлагаемый метод основан на том факте, что в данной зоне, в условиях четвертичных отложений, ММП образуются только под развитым мохово-лишайниковым слоем, который выступает мощным теплоизолятором, позволяющим сохранить отрицательную температуру грунтов в летний период. Участки с ММП обладают высоким тепловым альбедо, хорошо контрастирующим с окружающими их участками с немерзлотными породами. В ходе наших исследований было выявлено, что такие участки хорошо выделяются по 6 и 7 тепловому каналу спутниковых снимков LANDSAT-7 ETM+, отражающих тепловое излучение в диапазоне от 2 до 12 мкм. На основе расчетных данных, спутниковые снимки легко трансформируются в ГИС в растровые карты путем классификации на основе пороговых значений теплового альбедо.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, зона островной мерзлоты, дешифрирование, ДДЗЗ, ГИС

ISOLATION OF PERMAFROST IN THE AREA OF THEIR SPORADIC DISTRIBUTION USING THERMAL CHANNELS OF LANDSAT-7 ETM + SATELLITE IMAGES

^{1,2}Borisov B.Z., ¹Fedorov P.P., ¹Chikidov I.I., ^{1,3}Desyatkin A.R.

¹Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, e-mail: bzborisov@mail.ru;

²North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: bzborisov@mail.ru;

³Permafrost Research Institute n.a. P.I. Melnikov, SB RAS, Yakutsk, e-mail: desyatkinar@rambler.ru

This paper proposes a method for allocating of sporadic permafrost areas using the Infrared channel of Landsat-7 satellite. The proposed method is based on the fact that in this area, on the Quaternary sediments, sporadic permafrost is formed only under thick moss and lichen layer, which is a strong insulator, allowing to keep a negative soil temperature in summer. Duty of it, these areas with sporadic permafrost have a high thermal albedo, which contrasts well with the surrounding non permafrost landscapes. This research found that such sites are well allocated by thermal channels (#6 and 7) of LANDSAT-7 ETM + satellite images which reflecting the thermal radiation in the range of 2 to 12 μm . In GIS, satellite images are easily transformed into raster maps by classification based on thermal albedo thresholds.

Keywords: permafrost, sporadic permafrost zone, satellite image interpretation, remote sensing, GIS

Большая часть России располагается в зоне распространения многолетнемерзлых пород (далее ММП), занимающих более 60% территории страны. Наибольшее распространение ММП имеют в Сибири и на Дальнем Востоке, где в последние 50 лет происходит активное развитие центров добычи углеводородного сырья. В частности, на территории Юго-Западной Якутии с начала XXI века быстрыми темпами идет процесс освоения нефтегазовых месторождений, сырье с которых транспортируется по нефтепроводу «Восточная Сибирь – Тихий Океан» (ВСТО) и газопроводу «Сила Сибири». Технические сооружения добычи и транспортировки нефтегазового сырья на территории России большей частью построены в зоне распространения ММП. Строитель-

ство технических объектов, в особенности линейных, на ММП сопряжено с большими трудностями, которые вызваны криогенными процессами. Если в зоне сплошного распространения ММП стоит задача в изучении льдистости мерзлых грунтов, от которой зависят многие технические характеристики, то в зоне островной мерзлоты особую актуальность получает проблема выявления «островов» ММП.

В настоящее время в изучении геологических процессов (к которым относится и распространение ММП) все большую популярность набирает ГИС-анализ данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). Из широкого спектра ДДЗЗ наиболее эффективными являются снимки, полученные с помощью искусственных

спутников Земли. В данной статье описан метод выявления островной мерзлоты посредством анализа многоканальных спутниковых снимков Landsat-7.

Материалы и методы исследования

По схеме геоморфологического районирования Якутии район исследований располагается в южной части Среднесибирского плато, на Приленском платоном закарстовом плато [8]. Географически район располагается в междуречье между левыми притоками р. Лены – Нюя и Пеледуй. В пределах Нюйско-Пеледуйского водораздела ММП имеют островное распространение, под заболоченными, затененными и замшелыми участками, на нижних частях склонов ручьев, их днищ и логов. Большая часть исследуемой территории сложена гальми породами со среднегодовыми температурами, близкими к нулю или +1,0 °С. Среднегодовая температура ММП изменяется от 0 до -1,0 °С. Мощность сезонно-талого слоя в зависимости от местоположения изменяется от 1,5 до 2,5 м, а сезонно-мерзлого – 20 – 2,5 до 3,5 м, а максимальная мощность непосредственно ММП достигает 40 м. В небольших речных долинах и затененных депрессиях рельефа возможно развитие повторно-жильных льдов, на глубине до 5–10 м [1–3].

Район входит в Восточно-Сибирскую подобласть светлохвойных лесов Евразийской хвойно-лесной области, в пределах Южноякутской подпровинции Олекмо-Якутской провинции области бореальных лесов. В лесном покрове преобладают лиственничники из лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) и сибирской (*Larix sibirica*), на втором месте по распространенности стоят сосновые леса (*Pinus sylvestris*), площади других формаций незначительны. Преобладающие лиственничники характеризуются наличием многолетнемерзлых грунтов в подстилающих породах, что обусловлено характером развития подчиненных ярусов растительности, в особенности развитого мохового покрова, и достаточно высокой сомкнутостью крон древостоя (0,6–0,8). Сосновые леса занимают верхушки грив возвышений рельефа, образуя как чистые, так и смешанные древостои на хорошо прогреваемых грунтах без выраженных многолетнемерзлых пород [7].

Многолетнемерзлые породы в районе исследований развиты на затененных склонах с развитыми травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковыми ярусами. О криогенном характере ландшафта

свидетельствуют заболоченные маревые комплексы с вейниково-осоковым кочкарником и сфагново-зеленомошным покровом мощностью более 10 см, ерником и угнетенным редкостойным и рединным елово-лиственничным лесом. Помимо этого ММП маркируются по развитию мелкобугристого и среднебугристого микрорельефа, а также отдельных дифференцированных бугров пучения высотой до 1,0 и поперечником 2–3 м.

В качестве основного пространственного материала нами были использованы спутниковые снимки LANDSAT-7. Выбор данного типа ДДЗ обусловлен их доступностью, наличием большого количества тепловых каналов (табл. 1). Кроме этого, данные LANDSAT-7 широко используются в научных и прикладных исследованиях для создания карт ландшафтов и растительности. В качестве инструмента на борту спутника LANDSAT-7 выступает прибор ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), который ведет сбор данных в 8-спектральных каналах (табл. 1). В работе было использовано два снимка 15 июля 2000 года, и 12 августа 2011 года. Эти снимки были получены с ресурса GLCF-NASA в формате GeoTIFF и представляли растровые изображения, где спектральные характеристики представлены в 8-битовом формате (диапазон значений от 0 до 255).

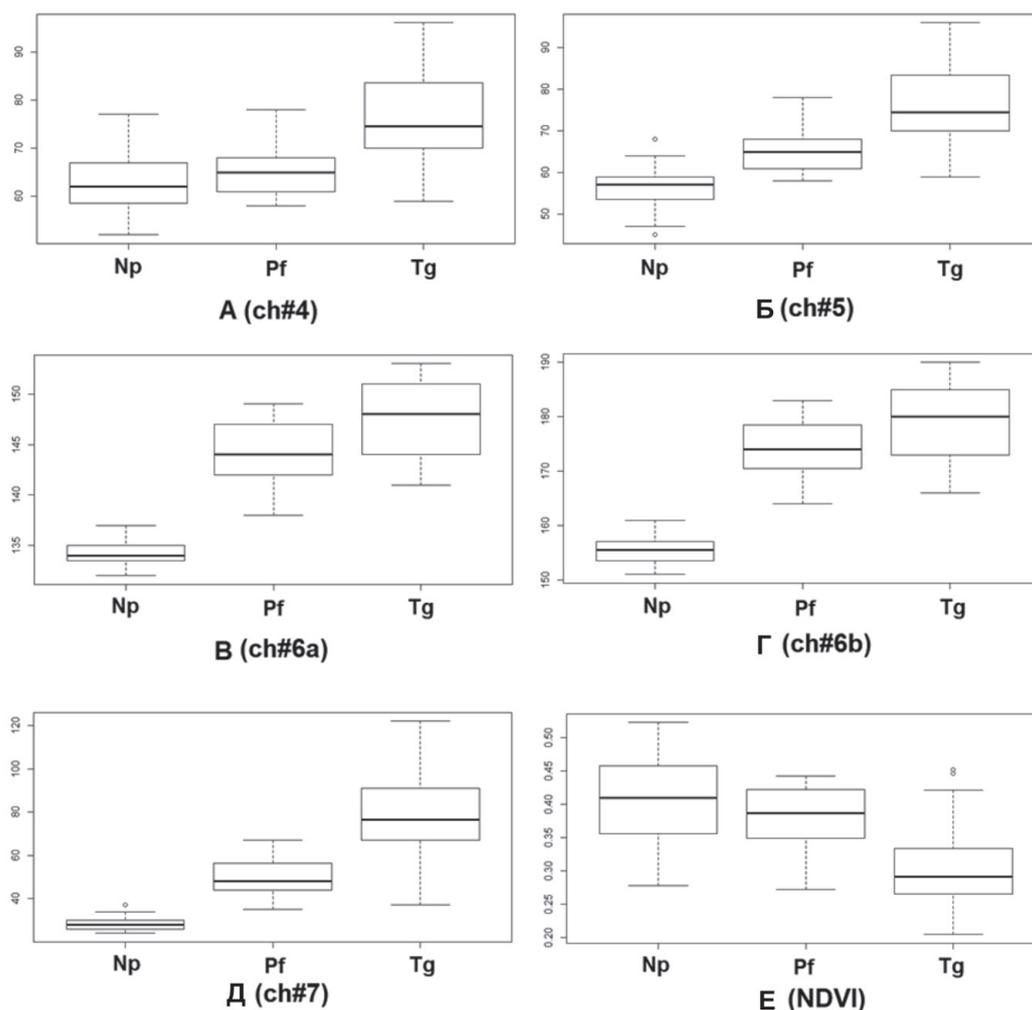
Для анализа мы использовали все тепловые каналы Landsat-7 (табл. 1): 4, 5, 6, 7. Так как 6 канал представлен двумя слоями 6a и 6b, мы использовали их как два отдельных канала, для упрощения расчетов.

Комплексные ландшафтно-геоботанические полевые работы проводились в летний период 2016 года (последняя декада июля), они заключались в заложении пробных площадок, где были проведены полные почвенно-геоботанические описания согласно общепринятым методикам.

В ходе полевых исследований на 24 пробных площадках из 80 было зафиксировано наличие ММП. ММП приурочены к следующим растительным сообществам: 1) верховые сфагновые болота; 2) ерники моховые; 3) лиственничные, еловые и сосновые зеленомошные редколесья; 4) сфагновые лиственничные редины. Данные растительные сообщества объединяет развитый моховой покров – в редколесьях сыроватых и сырых местообитаний преобладают *Pleurozium schreberi*, *Aulacomnium palustre*, *Hylocomium splendens*, с широким участием видов рода *Sphagnum sp.* Мощность мохового покрова варьируется от 10 до 30 см.

Основные характеристики спектральных каналов Landsat-7 ETM+

Номер канала	Диапазон спектра (мкм)	Разрешение (м/пиксель)	Название	Код
1	0,45–0,515	30	Голубой	–
2	0,525–0,605	30	Зеленый	–
3	0,63–0,69	30	Красный	–
4	0,775–0,90	30	Ближний инфракрасный	ch#4
5	1,55–1,75	30	Средний (коротковолновый) инфракрасный	ch#5
6	10,40–12,5	60	Длинноволновый инфракрасный (тепловой)	ch#6a, ch#6b
7	2,09–2,35	30	Средний (коротковолновый) инфракрасный	ch#7
8	0,525–0,90	15	Панхроматический (4,3,2)	–



Графики распределения спектральных яркостей и значений NDVI для немерзлых растительных сообществ (Np), мерзлых (Pf) и техногенных участков (Tg) на различных каналах спутникового снимка Landsat-7 ETM

Географические координаты точек сбора полевого материала были зафиксированы с помощью приемников GPS (система координат WGS-84) с последующим переносом данных в ГИС в точечный shp-файл с помощью программы ArcGIS 10.1.© (Redlands, USA). Так как описания техногенных участков, лишенных растительно-почвенного покрова, не проводились, точки на этих участках ставились уже в ГИС-программе. Далее в программе ArcGIS 10.1 в этот точечный слой были извлечены значения спектральной яркости тепловых каналов спутника Landsat-7. По атрибутивной информации точки были разделены на три группы: к первой группе отнесены те точки описаний, на которых были обнаружены ММП, они получили литеру – Pf (Permafrost) (n = 24). Вторая группа – точки описаний, где ММП не были обнаружены, – Np (Nonpermafrost) (n = 32). Третья группа – это точки, поставленные в границах техногенных участков – Tg (Technogenic) (n = 24). Площадь района исследований составила ~2000 км², координаты центральной точки 59.78N и 110.95E.

Векторизация технических объектов (площадки, дороги, газо- и нефтепроводы, ЛЭП) проводилась с использованием 8-го, панхроматического канала LANDSAT-7 с помощью программы ArcGIS 10.1, с созданием полигонального shp-файла. Статическая обработка данных с построением диаграмм «box-plot» была произведена в программе R.

Анализ информации извлеченной с тепловых каналов LANDSAT-7 показал, что разброс значений спектральной яркости по 4 каналу (ch#4) (рисунок, А) точек с ММП (Pf) фактически соответствует разбросу для точек без ММП (Np). Это происходит потому, что ближний ИК-диапазон, который фиксирует четвертый канал LANDSAT-7, активно отражается зелеными органами растений. Спектральная яркость техногенных объектов (Tg) отличается от них, но при этом минимальные значения близки к разбросу значений точек с растительным покровом.

Расхождение данных сильнее проявляются на 5 канале (ch#5) (рисунок, Б). Здесь мы наблюдаем, что

значения нижних и верхних квартилей не налаживаются друг на друга, но минимальные и максимальные значения точек с ММП (Pf) и без них (Np) все равно перекрываются между собой. По всей видимости, часть тепловых волн из этого диапазона так же или участвует в фотосинтезе или же усваивается растениями, но уже в значительно меньшей степени, чем волны из ближнего ИК-диапазона. Распределение значений точек с техногенных объектов (Tg) практически сходно с распределением по 5 каналу.

Самые хорошие результаты получаются при сравнении спектральной яркости 6а (рисунок, В), 6б (рисунок, Г) и 7 каналов (рисунок, Д). На графиках наглядно видно, что разброс данных точек Np не перекрывается с разбросом данных точек Pf и Tg. Наибольшие различия наблюдаются по 6б каналу, здесь разница между максимальными данными Np отличается от минимальных значений Pf на 5 единиц спектральной яркости, то есть на 2% (рисунок, Г). Тем самым в данном тепловом диапазоне (6 и 7 канал) происходит значительное отражение тепловых волн от участков с ММП и от лишенных растительности техногенных.

Для интерпретации наших данных в картографический формат мы провели классификацию растровых слоев (каналов) спутникового снимка Landsat-7. Цель данного анализа – выделение трех классов ландшафтов: 1) не мерзлотных; 2) мерзлотных и 3) техногенных. Для отделения мерзлотных ландшафтов и техногенных участков от не мерзлотных ландшафтов были использованы пороговые значения разброса данных (рисунок): 137 для 6а канала; 162 для 6б канала; 38 для 7 канала. Сравнение полученных результатов показало высокий уровень сходности – более 92%. Для отделения мерзлотных ландшафтов от техногенных участков использовалась векторная слой-маска, созданная по 8 каналу. Попытка использования раstra нормализованного вегетационного индекса NDVI, созданного на основе пересчета 3 и 4 канала Landsat, себя не оправдала. Мы предполагали, что участки, имеющие значения менее 0,32 (рисунок) должны быть выделены как лишенные растительного покрова техногенные участки, но из-за низкого пространственного разрешения данных Landsat в 3 и 4 каналах (30 м на пиксель) линейные объекты и небольшие площадки не выделялись.

Классификация по трем каналам (6а, 6б и 7) спутникового снимка Landsat показала, что площадь мерзлотных ландшафтов в районе исследований составляет 334 км², или ~17% от всей площади района исследований, что соответствует ранее опубликованным работам [2–4].

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенное исследование наглядно демонстрирует, что теплоизолирующие свойства мохового слоя хорошо видны на тепловых каналах спутниковых снимков Landsat-7, в диапазоне от 2 до 12 мкм (6-е и 7-е каналы). Высокое тепловое альbedo способствует возникновению и сохранению под моховым слоем ММП. В ближнем ИК-диапазоне, с длиной волны от 0,775 до 1,75 мкм, невозможно выделить ММП, так как разница между растительными сообще-

ствами с ММП и без них, несущественна (рисунок, А). Расчетные данные можно легко трансформировать в растровые карты путем классификации, где основой классификации служат пороговые значения теплового альbedo.

Если сравнить результаты нашего исследования с другими, в которых используются ДДЗЗ для изучения ММП, то можно выделить два основных направления:

1. Использование ДДЗЗ высокого и среднего разрешения для определения изменения береговой линии озер и других водоемов в ходе оттайки ММП [6]. В этих работах часто используются чисто визуальная оценка и векторизация контуров водоемов в ГИС по видимым каналам, с частичным использованием каналов ближнего ИК-диапазона.

2. ДДЗЗ выступает как пространственная основа для создания ландшафтных и геоботанических карт, по которым уже дают оценку распространенности ММП [9]. То есть каждому типу растительности соответствуют свои характеристики ММП, которые выявляются в ходе полевых наблюдений.

Наша работа, в сущности, относится ко второму направлению, так как мы выделяем растительность на ММП. Но в то же время, присутствие ММП не зависит от видов доминантов и от типа растительности. Главное условие – это наличие мощного теплоизолирующего слоя (мохово-лишайникового на торфях), на это указывают и другие авторы [4, 5]. Наше исследование основано на интерпретации физических свойств растительного покрова, когда основным дешифрирующим признаком является высокое тепловое альbedo в диапазоне от 2 до 12 мкм. Схожие результаты в ранее опубликованных работах мы не нашли.

Расчет границ потенциального залегания островных ММП по этой методике позволит без полевых исследований, уже на стадии предварительного проектирования, рассчитывать маршруты прокладки линейных сооружений (газо-, нефтепроводы, дороги, ЛЭП) с наименьшим пересечением мерзлотных ландшафтов, тем самым уменьшив затраты на дальнейшее их строительство и содержание, лишив их опасности быть подверженными криогенными процессами в ходе прогнозируемого потепления климата на земле.

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания ИБПК СО РАН на 2017–2020 по теме «Выявление обратимых и необратимых изменений почв и почвенного покрова мерзлотной области, характера

естественных и антропогенных экологических процессов и разработка фундаментальных основ охраны почв и почвенного покрова криолитозоны в условиях возрастающего антропогенного прессы и глобальных изменений», рег. номер № АААА-А17-117020110059-1.

Список литературы

1. Биякова В.И. Распространение и условия залегания вечной мерзлоты. Отчет Ленского отряда ЯНИМС Ин-та мерзлотоведения АН СССР. – Якутск, 1952. – 152 с.
2. Готовцев С.П., Васильев И.С. Научно-технический отчет: Мерзлотно-ландшафтные условия трубопроводной системы ВСТО (участок 712–772 км), фонды Ин-та мерзлотоведения СО РАН. – Якутск, 2006. – 99 с.
3. Граве Н.А. Вечная мерзлота в долинах рек юго-западной части Средне-Сибирского плоскогорья. – Труды Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР, 1952.
4. Мощанский В.А., Мулина А.В. Некоторые данные о строении верхней части многолетнемерзлой толщи в пределах Лено-Виллойского водораздела // Мерзлотные исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1961. – Вып. 2. – С. 115–128.
5. Назаров Г.И. К вопросу о распространении многолетнемерзлых пород на водоразделе Нижней и Подкаменной Тунгусок и в бассейне р. Ньюи. – Труды Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР, 1959. – С. 74–78.
6. Полищук Ю.М., Богданов А.Н. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // Известия ТПУ. – 2015. – № 12. – С. 104–114.
7. Чикидов И.И. Характеристика лесного покрова западной части Ленского района Республики Саха (Якутия) // Наука и образование. – 2016. – № 3(83). – С. 101–107.
8. Якутия / Природные условия и естественные ресурсы СССР. – М.: Изд. «Наука», 1965. – 104 с.
9. Zhang Y., Olthof I., Fraser R., Wolfe S.A. A new approach to mapping permafrost and change incorporating uncertainties in ground conditions and climate projections // The Cryosphere. – 2014. – № 8. – P. 2177–2194.