

— КАРТОГРАФИЯ И ГИС —

DOI 10.25587/SVFU.2020.19.3.003
УДК551.341, 911.52*С.В. Калиничева*

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА
В ИССЛЕДОВАНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД**

Аннотация. В статье охарактеризован дистанционный геофизический метод – тепловая инфракрасная съемка, воспроизводимая со спутника Landsat. Представлена методика выявления по ней многолетнемерзлых пород и таликов, а также показаны возможности картографирования их распространения в зоне прерывистой мерзлоты в горных районах Южной Якутии, на примере Эльконского горного массива и Олекмо-Чарского нагорья. Приведены результаты корреляционного анализа спутниковых данных с полевыми натурными материалами. Впервые более детально охарактеризованы индикационные свойства радиационной температуры (теплого инфракрасного излучения поверхности ландшафта), получаемого с помощью тепловой инфракрасной съемки Landsat для выявления и регионального картографирования многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: ландшафтная индикация, многолетнемерзлые породы, картографирование, спутниковые снимки, тепловая инфракрасная съемка, Эльконский горный массив, Олекмо-Чарское нагорье.

S.V. Kalinicheva

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

**APPLICATION OF THE REMOTE GEOPHYSICAL METHOD
IN THE STUDY OF PERMAFROST**

Abstract. The article describes the remote geophysical method – thermal infrared imagery reproduced from the Landsat satellite. The method of detecting permafrost and unfrozen ground by it is presented, as well as the possibilities of mapping their distribution in the discontinuous permafrost zone in the mountainous regions of South Yakutia, using the example of the Elkon Massif and the Olekma – Chara uplands. The results of correlation analysis of satellite data with field data are presented. For the first time, the indicative properties of the LST (thermal infrared radiation of the landscape surface) obtained using Landsat thermal infrared imagery for the identification and regional mapping of permafrost are characterized in more detail.

Keywords: landscape indication, permafrost, mapping, satellite images, thermal infrared imagery, Elkon Massif, Olekma – Chara uplands.

Введение

В геокриологических исследованиях используют различные геофизические методы, посредством которых изучают распределение естественных или искусственно создаваемых физических полей – тепловых, температурных, электрических, акустических, радиоактивных и др. Широкое внедрение этих методов ведет к повышению производительности мерзлотной съемки, снижению ее себестоимости за счет сокращения объемов дорогостоящих и трудоемких горно-буровых работ, повышению качества исследований. По месту проведения различают скважинные методы (каротаж), наземные и дистанционные, проводимые с летательных аппаратов [1]. К интенсивно развиваемым дистанционным геофизическим методам относится тепловая

КАЛИНИЧЕВА Светлана Вячеславовна – к.г.н., н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: ikoveta@rambler.ru

KALINICHEVA Svetlana Vyacheslavovna – Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS. E-mail: ikoveta@rambler.ru

инфракрасная съемка, осуществляемая с помощью тепловизоров [2,3]. Данные приборы представляют собой оптико – электронные устройства пассивного типа, позволяющие регистрировать тепловое ИК излучение (8-14 мкм), измерять и преобразовывать его в значения яркости изображения [4,5]. Приборы, которые дают возможность количественно измерять радиационную температуру снимаемого объекта, называют инфракрасными радиометрами [6].

Тепловизионной съемкой фиксируют собственное тепловое излучение объектов земной поверхности (в отличие от отраженного солнечного излучения, видимого человеческим глазом), что дает возможность качественно оценивать их внутреннее состояние. Инфракрасное излучение невидимо для человеческого глаза, но может быть обнаружено при помощи специальных фотоприемников, оптимизированных под конкретный спектральный диапазон [4]. Важная особенность изображений, полученных в тепловом инфракрасном диапазоне заключается в том, что они регистрируют не температуру объектов, а интенсивность теплового излучения. По зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая *радиационная температура*, которая обычно ниже физической, поскольку она зависит еще и от излучательной способности объекта, и от ослабления излучения в атмосфере. Но даже в случае регистрации не самих температур, а только температурных (радиационных) контрастов, возможно эффективное выделение объектов и определение их характеристик [7].

Преимуществами съемки в тепловом инфракрасном диапазоне являются то, что, во-первых, тепловые снимки содержат информацию, которую практически невозможно получить каким-либо иным способом, например, с помощью снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне; во-вторых, возможность обнаружения объектов за счёт различий в их излучательной способности в отсутствие естественного освещения; данное свойство позволяет наблюдать предметы в полной темноте; в-третьих, широкие возможности регистрации динамичных тепловых процессов, в частности, таких, которые происходят в течение суток (сезонов, ряда лет).

С применением вышеприведенного метода теплового дистанционного зондирования были исследованы мерзлотные условия горных районов Южной Якутии – Эльконский горный массив и Олекмо-Чарское нагорье. Исследование этих районов имеет особое значение в виду концентрации в ней различных природных ресурсов и их экономической значимости. В пределах исследуемых территорий рассмотрены водораздельные и склоновые ландшафты на абсолютных высотах от 700 до 1200 м. Данные территории исследования расположены в пределах Южной Якутии и имеют следующие координаты: Эльконский горный массив – 58° 24'.. – 58° 48'.. с.ш.; 125° 45'.. – 126° 36'.. в.д.; Тарыннахское месторождение – 58°10'.. – 58°22'.. с.ш.; 119°10'.. – 119°25'..в.д.

Природные условия исследуемых участков

Обе территории исследования имеют схожую геолого-географическую среду. В геологическом отношении исследуемые территории сложены преимущественно кристаллическими породами архейского и раннепротерозойского возраста. С поверхности породы перекрыты чехлом четвертичных отложений. В районе Эльконского горного массива на водораздельных и склоновых участках эти отложения имеют мощность до 17 м, в районе Тарыннахского месторождения в Олекмо-Чарском нагорье они представлены относительно маломощным чехлом.

Рельеф исследуемых территорий преимущественно среднегорный и отличается значительным расчленением. Абсолютные отметки водораздельных участков изменяются от 900 до 1449 м (в Эльконском горном массиве – 1200-1449 м; в Олекмо – Чарском нагорье – 900-1400 м). Абсолютные превышения водоразделов над днищами речных долин составляют от 350 до 900 м.

Климат исследуемых территорий резко континентальный. Здесь выпадает сравнительно большое количество осадков для Якутии (от 430 до 700 мм). Средняя годовая температура воздуха изменяется от -6 до -10°C [8].

Многолетнемерзлые толщи исследуемых территорий характеризуются значительной пространственной неоднородностью. По распространению преобладают прерывистые многолетнемерзлые толщи, и, залегают преимущественно на крутых склонах северной и западной экспозиций, а также на конусовидных водоразделах гольцов и подгольцовых зон. Талики развиты преимущественно в долинах рек и ручьев, на плоских водоразделах (до отн. 1050-1100 м), пологих склонах различных экспозиций и на южных и восточных склонах различной крутизны.

Средняя годовая температура пород в Эльконском горном массиве варьирует от +1,5 до -4,5°C, в Олекмо-Чарском нагорье – +2,5 до -3,8°C [9, 10].

Материалы и методы исследования

В качестве основных материалов для настоящих исследований были использованы данные о температуре горных пород в 45 скважинах – в Эльконском горсте и 13 скважинах – в Тарыннахском месторождении, пробуренных глубиной от 10 до 500 метров в разных ландшафтных условиях. Данные по снежному покрову были проанализированы по материалам снегомерной съемки и режимных наблюдений за динамикой снежного покрова. В дальнейшем эти данные были интерпретированы с данными дистанционного зондирования Landsat – 5/TM. Дистанционное исследование растительного и снежного покровов, а также радиационной температуры осуществлялось по космическим снимкам Landsat TM/TIRS. Пространственное разрешение снимка – 30 м, тепловой канал – 100-120 м. В качестве наиболее репрезентативного снимка, в большей степени отображающего ландшафтную дифференциацию, был выбран августовский снимок. Для расчета мощности снежного покрова был использован майский снимок. Изучение ландшафтной структуры исследуемой территории основывалась на классификационных построениях Мерзлотно-ландшафтной карты Якутской АССР масштаба 1:2 500 000 [11].

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [12]. С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности и экспозиции склонов. Анализ пространственной дифференциации растительного и снежного покровов производился по синтезу каналов 4-5-3 и 4-3-2 соответственно. Для интерпретации типов растительности и высоты снежного покрова, мультиспектральные снимки разделялись на классы по методу неконтролируемой классификации [13].

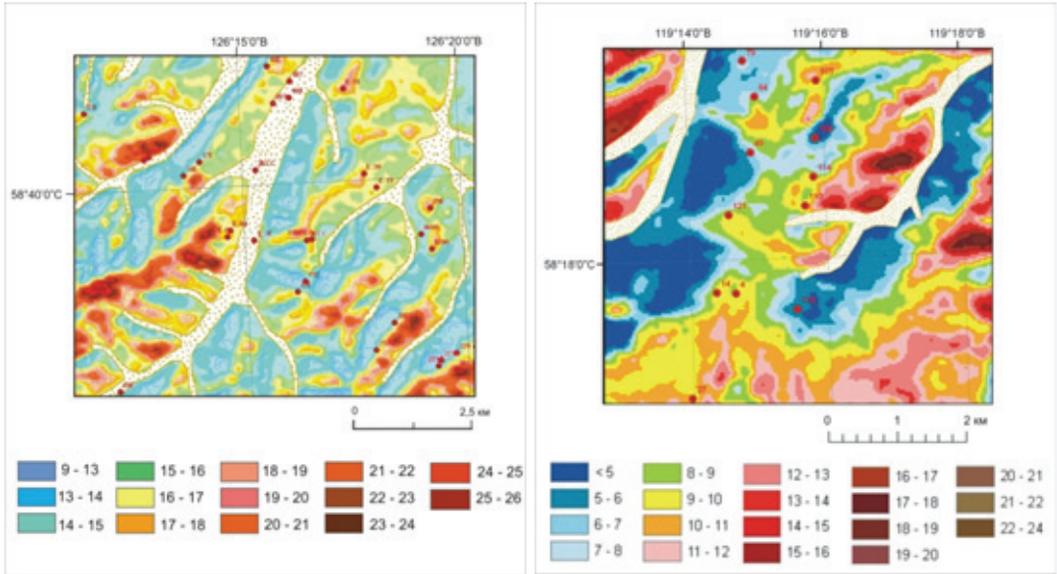
Для расчета радиационной температуры поверхности ландшафта из серии снимков за год были выбраны снимки, имеющие высокую корреляцию с температурой подстилающих пород и отвечающие рекомендациям выполнения тепловых съемок [3]. Так, для Эльконского горного массива был выбран снимок, полученный 21 августа 2009 г. (рис. 1а), для Олекмо-Чарского нагорья снимок от 18 сентября 2009 г. (рис. 1б). Вычисление значений РТ проходило в два этапа по алгоритму, описанному Chandaretal. [14, 15].

Результаты исследований

Исследование проводилось в несколько этапов. На начальных этапах исследования был проведен сопряженный анализ полевых геотермических данных с ландшафтными факторами и РТ, а также были выявлены корреляционные связи и составлена ландшафтно – криоиндикационная таблица для исследуемых территорий. Так, по выбранному нами снимку (от 21 августа 2009 г.), на момент съемки для Эльконского горного массива были получены пределы изменчивости радиационной температуры от 9 до 26°C. Анализ карты РТ (рис. 1а) совместно с данными полевых мерзлотных исследований показывают, что при прочих равных условиях интенсивность теплового излучения областей развития ММП, как правило, ниже (9-15°C), чем у ландшафтов, развитых на талых породах (16-19°C). Однако, на участках развития каменных развалов, курумов, радиационная температура в летний период оказывается выше, чем на таликах (17-26°C). Это объясняется тем, что обнаженные горные породы нагреваются сильнее участков с растительностью.

В районе Тарыннахского месторождения (Олекмо – Чарское нагорье) сопоставление геотермических данных по скважинам и значений теплового инфракрасного излучения поверхности (рис. 1б) в исследуемом районе показало, что значения РТ от 8°C и ниже идентифицируют многолетнемерзлые породы, а значением РТ 9-12 °C фиксируются талые породы. РТ 8-9°C отражает породы с переходной температурой (близкой к 0°C). Участки с каменными полями, под которыми развиваются мерзлые породы, как упоминалось выше, фиксируются в разных ландшафтных условиях высокими значениями РТ (9-20°C) из-за интенсивного прогревания их поверхности в теплый сезон года.

Далее, по данной таблице были составлены алгоритмы распознавания ММП и талых пород отдельно для групп экспозиций, сходных по климатическим условиям. На основе вышеприведенных алгоритмов, с применением программ ArcGis 10.1 нами была составлена среднemasштабная мерзлотно-ландшафтная карта Эльконского горного массива (рис. 2а) и Олекмо-Чарского нагорья (рис. 2б). В основе её составления заложена разработанная в Институте мерзлотоведения СО РАН методика картографирования мерзлотных ландшафтов [16].



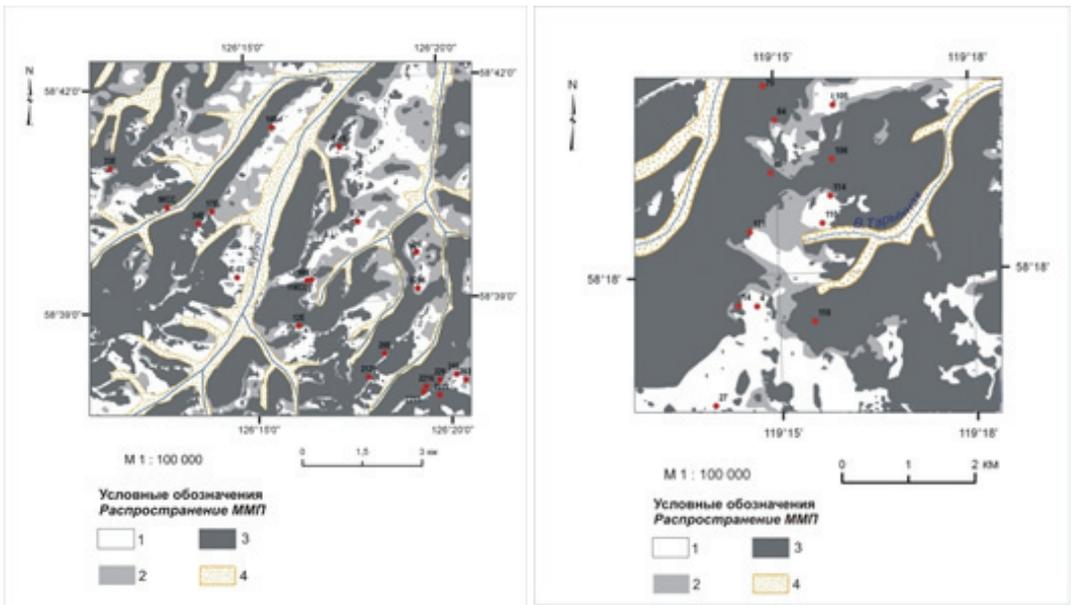
а

б

Эльконский горст (момент съемки 21.08.2009):
 9-15°C – ММП,
 15-16°C – породы с переходной температурой,
 16-19°C – талые породы,
 17-26°C – мерзлые породы.

Олекмо-Чарское нагорье (Тарыннахское месторождение) (момент съемки 18.09.2009):
 До 8°C – ММП,
 8-9 °C – породы с переходной температурой,
 9-12 °C – талые породы,
 9 – 20 °C – мерзлые породы.

Рисунок 1 – (а) РТ Эльконского горного массива на момент съемки 21.08.2009; (б) РТ Тарыннахского месторождения на момент съемки 18.09.2009. Температура в легенде дана в °C. Точки с цифрами – номера геотермических скважин.



а

б

Рисунок 2 – (а) Карта распространения Эльконского горного массива, фрагмент; (б) Карта распространения мерзлых пород Олекмо-Чарского нагорья (Тарыннахское месторождения), фрагмент. Температура в легенде дана в °C. Точки с цифрами – номера геотермических скважин. 1 – талые породы; 2 – породы с температурой около 0°C; 3 – ММП; 4 – долины рек

Заключение

Проведенные работы с использованием космоснимков и материалов детальных полевых исследований, в первую очередь, анализа распределения снежного покрова и РТ на ключевых участках Эльконского горного массива и Олекмо – Чарского нагорья, позволило выявить особенности распространения многолетнемерзлых пород и таликов. По сравнению с традиционным геокриологическим картографированием В.А. Кудрявцева [17], К.А. Кондратьевой [18] и др., где породы дифференцируются в основном как островные ММП, массивно-островные, прерывистые и сплошные, данная методика позволяет конкретно выделить участки с мерзлыми и тальми породами и выявить особенности распространения ММП и таликов.

Результаты настоящего исследования посредством представленной методики с применением радиационной температуры показали возможность применения тепловой инфракрасной съемки при геокриологических исследованиях в горных районах с учетом сезона (август-сентябрь) и времени (до полудня) полета спутника.

Литература

1. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А. и др. Методика мерзлотной съемки. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 358 с.
2. Шилин Б.В. Тепловая аэросъемка. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.
3. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая. – М.: Недра, 1993. – 128 с.
4. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры: справочник. – Киев: Техника, 1987. – 166 с.
5. Ллойд Д. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
6. Сафронов Ю. П., Андрианов Ю. Г., Сафронов Ю.П. Инфракрасная техника и космос. – М.: Советское радио, 1978. – 248 с.
7. Дагуров П.Н., Чимитдоржиев Т.Н. Методы дистанционного исследования земной поверхности. – Улан-Удэ: Изд-во ФГОУ ВПО, 2005. – 88 с.
8. Караушева А.И. Климат и микроклимат района Кодар -Чара-Удокан. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 128 с.
9. Железняк М.Н., Дорофеев И.В., Сериков С.И., Осипов Е.А. Геокриологические условия Эльконского горста // Научное обеспечение реализации мегапроектов Республики Саха (Якутия). – Якутск: Компания «Дани Алмас», 2009. – С. 67-72.
10. Железняк М.Н. Геокриологические условия Олекмо-Чарского поднятия в зоне проектируемых линейных сооружений на участке Икабъекан-Тарыннах / М.Н. Железняк, В.И. Жижин, С.И. Сериков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1675.
11. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР: Масштаб 1:2 500 000 / Гл. ред. П.И. Мельников. – М.: ГУГК, 1991.
12. CGIAR-CSI // (режим доступа: <http://srtm.csi.cgiar.org>) дата обращения: 08.12.2018.
13. ArcGIS Resources: сайт Esri // (режим доступа: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/009z000000pn000000>) дата обращения: 11.10.2018.
14. Chander G. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures, and Postcalibration Dynamic Ranges / G. Chander, B.L. Markham // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – № 41(11). – P. 2674-2677.
15. Chander G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113. – № 5. – P. 893-903.
16. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, 1991. – 140 с.
17. Кудрявцев В.А. Температура вечномерзлой толщи в пределах СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 182 с.
18. Кондратьева К.А. Методика мелкомасштабного (1: 500 000 – 1 000 000) картографирования многолетнемерзлых пород/ К.А. Кондратьева // Мерзлотные исследования. –1966. – № 6. – С. 76-87.

References

1. Kudrjavcev V.A., Garagulja L.S., Kondrat'eva K.A. i dr. Metodika merzlotnoj s#emki. – M.: Izd-vo MGU, 1979. – 358 s.
2. Shilin B.V. Teplovaja ajeros#emka. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 247 s.
3. Gornyj V.I., Shilin B.V., Jasinskij G.I. Teplovaja ajerokosmicheskaja. – M.: Nedra, 1993. – 128 s.
4. Kriksunov L.Z., Padalko G.A. Teplovizory: spravochnik. – Kiev: Tehnika, 1987. – 166 s.
5. Llojd D. Sistemy teplovidenija. – M.: Mir, 1978. – 414 s.
6. Safronov Ju. P., Andrianov Ju. G., Safronov Ju.P. Infrakrasnaja tehnika i kosmos. – M.: Sovetskoe radio, 1978. – 248 s.
7. Daguov P.N., Chimitdorzhiev T.N. Metody distancionnogo issledovanija zemnoj poverhnosti. – Ulan-Udje: Izd-vo FGOU VPO, 2005. – 88 s.
8. Karausheva A.I. Klimat i mikroklimat rajona Kodar-Chara-Udokan. – L.: Gidrometeoizdat, 1977. – 128 s.
9. Zheleznyak M.N., Dorofeev I.V., Serikov S.I., Osipov E.A. Geokriologicheskie uslovija Jel'konskogo gorsta // Nauchnoe obespechenie realizacii megaproektov Respubliki Saha (Jakutija). – Jakutsk: Kompanija «Dani Almas», 2009. – S. 67-72.
10. Zheleznyak M.N. Geokriologicheskie uslovija Olekmo-Charskogo podnjatija v zone proektiruemyh linejnyh sooruzhenij na uchastke Ikab#ekan-Tarynnah / M.N. Zheleznyak, V.I. Zhizhin, S.I. Serikov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2014. – № 6. – S. 1675.
11. Merzlotno-landshaftnaja karta Jakutskoj ASSR: Masshtab 1:2 500 000 / Gl. red. P.I. Mel'nikov. – M.: GUGK, 1991.
12. CGIAR-CSI // (rezhim dostupa: <http://srtm.csi.cgiar.org>) data obrashhenija: 08.12.2018.
13. ArcGIS Resources: sajt Esri // (rezhim dostupa: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/009z000000pn000000>) data obrashhenija: 11.10.2018.
14. Chander G. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures, and Postcalibration Dynamic Ranges / G. Chander, B.L. Markham // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – № 41(11). – P. 2674-2677.
15. Chander G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113. – № 5. – P. 893-903.
16. Fedorov A.N. Merzlotnye landshafty Jakutii: metodika vydelenija i voprosy kartografirovanija. – Jakutsk: In-t merzlotovedenija SO RAN SSSR, 1991. – 140 s.
17. Kudrjavcev V.A. Temperatura vechnomerzloj tolshhi v predelakh SSSR. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1954. – 182 s.
18. Kondrat'eva K.A. Metodika melkomasshtabnogo (1: 500 000 – 1 000 000) kartografirovanija mnogoletnemerzlyh porod / K.A. Kondrat'eva // Merzlotnye issledovanija. – 1966. – № 6. – S. 76-87.