

Калиничева С.В.<sup>1</sup>

## ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ И ТАЛЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КРИОЛИТОЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ОЛЕКМО-ЧАРСКОГО НАГОРЬЯ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ)

### АННОТАЦИЯ

В статье приведена апробация методики выявления многолетнемерзлых пород и таликов с использованием спутниковых данных, а также показаны возможности картографирования их распространения в зоне прерывистой мерзлоты в горных районах Южной Якутии, на примере Олекмо-Чарского нагорья. Исследование проводилось в центральной части Тарыннахского железорудного месторождения (Мурун-Тарыннахского поднятия). Приведены результаты корреляционного анализа спутниковых данных с полевыми натурными материалами. Детально охарактеризованы индикационные свойства радиационной температуры (теплового инфракрасного излучения поверхности ландшафта), получаемого с помощью инфракрасной съемки Landsat-5/TM в канале 6 для выявления и регионального картографирования многолетнемерзлых пород. Выражено влияние физико-географических факторов (ландшафтных криоиндикаторов), влияющих на формирование температуры подстилающих пород и тем самым на их состояние (мерзлое и талое), которое отражается в интенсивности радиационной температуры. Криоиндикаторы дополняют друг друга и в условиях резкорасчлененного горного рельефа достаточно четко позволяют выявлять массивы мерзлых и талых пород. Использован метод неконтролируемой классификации для дифференциации типов растительного и снежного покровов с мультиспектральных снимков в программе ArcGis10.1.

По результатам исследований с использованием методики выявления мерзлых и талых пород с применением спутниковых снимков, разработанной ранее автором на примере Эльконского горного массива, определены закономерности формирования температуры подстилающих пород в подошве годовых колебаний по основным физико-географическим факторам, а также получена новая пространственная картина (карта) дифференциации мерзлых и талых пород в рассматриваемом районе исследования. Повторная апробация разработанной методики подтвердила возможность ее использования для исследования многолетнемерзлых пород в горных районах криолитозоны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ландшафтная индикация, многолетнемерзлые породы, картографирование, дистанционное зондирование, тепловая инфракрасная съемка.

---

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, 677010, Якутск, Россия, e-mail: [ikoveta@rambler.ru](mailto:ikoveta@rambler.ru)

**Svetlana V. Kalinicheva<sup>1</sup>**

**IDENTIFICATION AND MAPPING OF PERMAFROST AND THALIKS USING SATELLITE IMAGES (ON THE EXAMPLE OF THE OLEKMO-CHARSKIY HIGHLAND IN SOUTHERN YAKUTIA)**

**ABSTRACT**

Approbation of the technique for the identification of permafrost and taliks using satellite data is shown in the article, as well as the possibilities of mapping their distribution in the zone of discontinuous permafrost in the mountainous regions of South Yakutia, as exemplified by the Olekma-Charskiy Highland. The study was carried out in the central part of the Tarynnakh iron ore deposit (Murun-Tarynnakh Uplift). The results of the correlation analysis of satellite data with field full-scale materials are presented. The indicator properties of the radiation temperature (thermal infrared radiation from the surface of the landscape) obtained using the Landsat-5/TM infrared survey in channel 6 for the identification and regional mapping of permafrost are described in detail. The influence of physical and geographical factors (landscape cryoindicators) affecting the formation of the temperature of the underlying rocks and thereby their state (frozen and thawed), which is reflected in the intensity of the radiation temperature, is expressed. Cryoindicators supplement each other and, under the conditions of sharply dissected mountain relief, sufficiently clearly reveal the masses of permafrost and thawed rocks. The method of uncontrolled classification for differentiating vegetation and snow cover types from multispectral snapshots was used in the ArcGis10.1 program.

Based on the results of studies using the method for detecting permafrost and thawed rocks using satellite imagery, developed earlier by the author on the example of the Elkon mountain massif, the patterns of formation of the temperature of the underlying rocks in the base of annual fluctuations by the main physical and geographical factors were determined, and a new spatial picture) differentiation of permafrost and thawed rocks in the study area under consideration. The repeated approbation of the developed technique confirmed the possibility of its use for the study of permafrost in the mountainous regions of the cryolithozone.

**KEYWORDS:** landscape indication, permafrost, mapping, remote sensing, thermal infrared survey.

**ВВЕДЕНИЕ**

Южная Якутия – один из наиболее осваиваемых районов страны ввиду концентрации в нем различных природных ресурсов и их экономической значимости. Интенсивное хозяйственное освоение территории делает необходимым разработку действенных мер по охране природной среды, рациональному использованию, определению мерзлотно-инженерной оценки территории, принципов и методов строительства в условиях сложной мерзлотной обстановки. В частности, промышленное освоение крупных месторождений, расположенных на юго-западе Республики Саха (Якутия), одним из которых является Мурун-Тарыннахское поднятие, с крупнейшим по разведанным запасам – Тарыннахским железорудным месторождением, предполагает в программе развития производительных сил России и РС(Я) до 2020 г., создание инфраструктуры, включающей в том числе строительство дорог, линий электропередач и различных инженерных

---

<sup>1</sup> Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, 677010, Yakutsk, Russia, *e-mail*: [ikoveta@rambler.ru](mailto:ikoveta@rambler.ru)

сооружений. Решение перечисленных и многих других вопросов должно основываться на знании мерзлотной обстановки территории. На территориях с расчлененным горным рельефом проведение мониторинговых исследований многолетнемерзлых пород затрудняется сложным расчлененным горным рельефом территории. В условиях нехватки пространственных данных одним из способов решения могут служить спутниковые снимки, возможность и актуальность использования которых обуславливается их доступностью, большим пространственным охватом, повторяемостью съемок и современными методами их обработки.

Возможность использования данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) в геокриологических исследованиях обусловлено тем, что в горных районах на формирование температуры пород (от которых зависит их состояние) влияет комплекс факторов, большинство из которых являются физиономичными и потому находят отражение на данных ДЗЗ. Такое обстоятельство дает возможность проводить ландшафтно-криоиндикационное исследование с помощью материалов спутниковой съемки. Помимо косвенных ландшафтных криоиндикаторов, имеет место прямое геокриологическое дешифрирование, в данном случае, по тепловому инфракрасному излучению поверхности ландшафта. Тепловая инфракрасная съемка показывает интенсивность излучения поверхности ландшафта в зависимости от состояния подстилающих пород и обычно обозначается термином «радиационная температура».

О возможности выявления мерзлых и талых пород по прямым признакам (цвету и плотности фототона на снимке) разные исследователи выдвигали предположение еще в 1970–1980-х гг. [Горный, Шилин, 1978; Некрасов и др., 1979], когда появились новые виды съемки: многозональная, инфракрасная и радиотеплокационная. В настоящий момент тепловая инфракрасная съемка достаточно широко используется в исследовании многолетнемерзлых пород [Корниенко, 2007; Nachev et al., 2009]. Однако **детальных региональных исследований в горных районах криолитозоны с использованием и глубоким анализом этого параметра, наряду с анализом других температуроформирующих факторов, нет.** Проведение подобного исследования позволило автору разработать методику (алгоритм) выявления мерзлых и талых пород в горных районах криолитозоны, на примере Эльконского горного массива, состоящую из ландшафтных криоиндикаторов и вышеуказанного параметра [Калиничева и др., 2017].

Целью настоящей работы является апробация данной методики на примере Тарыннахского месторождения, расположенного на Олекмо-Чарском нагорье.

Участком исследования является центральная часть Тарыннахского месторождения, расположенная в междуречье рек Торго и В. Тарыннах, по вертикали от 700 до 1200 м. Климат рассматриваемого региона суровый. Среднегодовая температура воздуха на данной территории варьирует от  $-6$  до  $-10$  °С. Годовая амплитуда колебаний среднемесячных температур воздуха составляет  $43-53$  °С [Караушева, 1977].

Рельеф района исследования является переходной зоной от Лено-Алданского плато к Олекмо-Чарскому плоскогорью и отличается значительным расчленением, большими абсолютными отметками (до 1300–1400 м) и представляет собой типичное нагорье (Мурун-Тарыннахский геоморфологический район). Нагорье сложено преимущественно кристаллическими породами архейского возраста.

Многолетнемерзлые породы (ММП) в этой области имеют прерывистое распространение и залегают на склонах северной и западной экспозиций, а также в подгольцовых и гольцовых областях водоразделов. Температура пород изменяется на водоразделах – от  $+0,5$  до  $-3,8$  °С, в седловинах, между водоразделами – от  $+2,5$  до  $+0,8$  °С, на нагорных террасах в подгольцовых зонах; от  $+1,0$  до  $+0,2$  °С [Железняк и др., 2014].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных материалов для настоящих исследований были использованы данные о температуре горных пород в 13 скважинах, пробуренных глубиной от 10 до 250 м в разных ландшафтных условиях Тарыннахского месторождения (научно-технические отчеты Института мерзлотоведения). Данные по снежному покрову были проанализированы также по материалам научно-технических отчетов. В дальнейшем эти данные были интерпретированы с данными дистанционного зондирования Landsat-5/TM.

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [<http://srtm.csi.cgiar.org>]. С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности и экспозиции склонов. Уклоны поверхности были распределены по следующим грациям: очень пологие ( $2-5^\circ$ ), пологие ( $5-10^\circ$ ), средние ( $10-15^\circ$ ), крутые ( $15-25^\circ$ ) и очень крутые ( $25^\circ$  и выше).

Для изучения растительного и снежного покровов, а также радиационной температуры поверхности использовались космоснимки Landsat-5/TM (каналы 1–5 с разрешением 30 м и канал 6 (тепловой) с разрешением 120 м). Для изучения растительных сообществ в качестве индикатора многолетнемерзлых пород был использован августовский снимок 2011 г., который хорошо отражает фенологические особенности растительного покрова.

Анализ пространственной дифференциации растительного и снежного покровов производился по синтезу каналов 4–5–3 и 4–3–2 соответственно. Компенсация разницы освещенности северных и южных склонов при выделении растительных типов осуществлялась в программе ERDAS Imagine [<http://www.giscraft.ru/methods/method9.shtml>]. Для интерпретации типов растительности и высоты снежного покрова, мультиспектральные снимки разделялись на классы по методу неконтролируемой классификации [<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html>].

В качестве исходного снимка для выявления различий распределения мощности снежного покрова с учетом сезона разрушения снежного покрова на Тарыннахском месторождении был взят снимок 13 мая 2003 г., который анализировался со снимками с более поздней датой для выявления снежников. Для расчета радиационной температуры поверхности был выбран снимок 18 сентября 2009 г. исходя из времени, когда тепловые контрасты на изучаемой территории максимальны (период, когда сезонно-талый слой достигает наибольших значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает) и растительный покров не создает экранирующего воздействия.

Для интерпретации радиационной температуры были учтены рекомендации выполнения тепловых съемок [Горный и др., 1993]. Вычисление значений радиационной температуры проводилось по методу, приведенному на сайте [<http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>]. Для пространственно-временного анализа при работе с данными Landsat-5/TM использовались программы Multispec и ArcGis10.1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### **Влияние физико-географических факторов на формирование температуры пород**

К физико-географическим факторам, влияющим на формирование температуры пород в горных районах, от которых зависит их состояние, относятся рельеф местности (высота, уклон и экспозиция), растительный и снежный покровы и ряд других.

*Рельеф.* Характер рельефа в формировании мерзлых горных пород играет особую роль. Положение участка в рельефе местности во многом определяет температурный режим пород через экспозицию склона, высоту над уровнем моря и является в этом отношении сильным и многообразно действующим фактором. При этом важна также и крутиз-

на склона, влияющая на угол падения солнечных лучей и, таким образом, на количество поглощенной солнечной радиации [Общее мерзлотоведение, 1978]. Под воздействием орографических факторов солнечная радиация, поступающая на поверхность, распределяется неравномерно. Это является главной причиной различий в микроклимате, глубине сезонного протаивания и формировании температуры поверхности.

Суточные суммы прямой солнечной радиации для склонов северной и южной экспозиций в горных областях юга Сибири были вычислены А.И. Караушевой [1977]. Было выявлено, что на северных и южных экспозициях, в зависимости от крутизны склонов, суточные суммы прямой солнечной радиации могут различаться в 2,3–2,4 раза. Так, по данным исследований максимальное количество солнечной радиации на северных склонах приходится на пологие склоны, а с ростом уклона поверхности ее количество понижается. На южных склонах приходится наибольшее количество солнечной радиации, однако в отличие от северных склонов, с ростом уклона поверхности сумма прямой солнечной радиации увеличивается.

Представленная картина приходящей солнечной радиации напрямую влияет на дифференциацию мерзлых и талых пород. Так, на северных склонах талые породы приурочены к пологим склонам, на южных склонах развиты в основном талые породы.

*Растительный покров* играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, выступая в качестве промежуточной среды. С теплофизической точки зрения растительный покров представляет собой нечто среднее между воздухом и дисперсной средой. Именно этим свойством определяется их влияние на формирование температуры поверхности пород. В отличие от дисперсных сред растительный покров участвует в поглощении радиации и встречном излучении всем объемом [Общее мерзлотоведение, 1978].

В горных районах растительный покров (в зависимости от типа) разнонаправленно действует на температурный режим пород. Так, растительный покров при высокой сомкнутости крон оказывает охлаждающее влияние за счет поглощения солнечной радиации летом и уменьшения мощности снежного покрова зимой. Данным свойством обычно обладают лиственничные леса, которые характерны в основном на подножьях склонов наветренных экспозиций (северных, северо-западных и западных), а также местами на средних и высоких участках склонов, где они произрастают в ложбинных участках. Помимо вышеуказанного типа растительного покрова, наибольшей вероятностью развития мерзлых пород обладает тундровый растительный покров, представленный разреженным кедровым стлаником с фрагментами каменных развалов, а также участки без растительного покрова – каменные развалы с лишайниковыми ассоциациями. Заросли кедровых стлаников, лиственничные редколесья с кедровым стлаником и сосново-лиственничные леса на низкогорьях в определенных условиях могут развиваться как в мерзлых, так и в талых горных породах.

*Снежный покров.* Отепляющий эффект снега определяется мощностью и плотностью снежного покрова. Влияние снега на глубину сезонного промерзания и температуру горных пород подробно рассмотрено в работах В.А. Кудрявцева [1954], Г.М. Фельдмана [1977] и др.

В условиях резкоконтинентального климата и резкорасчлененного рельефа, снег является одним из наиболее действенных факторов, предохраняющих горные породы от охлаждения в зимний период, что приводит к повышению среднегодовых температур.

Под воздействием рельефа в горных районах изменяется циркуляция воздушных масс, определяющая снегоперенос в зимний период. В результате формируются участки с резко различной высотой снежного покрова. Помимо метелевого переноса большое влияние на снегонакопление оказывает микрорельеф поверхности, а также лесной и кустарниковый ярусы растительного покрова.

В исследуемом районе преобладают ветры преимущественно западных и северо-западных румбов. Поэтому северные, северо-западные, западные экспозиции склонов

являются наветренными. Высота снежного покрова на этих экспозициях варьирует от 10 до 90 см, в их пределах преимущественно развиты многолетнемерзлые породы.

Восточные, юго-восточные, южные и юго-западные экспозиции являются подветренными (высота снежного покрова 90 см и более). Здесь развиты преимущественно талые породы.

Северо-восточная экспозиция является переходной от наветренных экспозиций к подветренным и характеризуется мощностями снежного покрова от 40–90 см и выше. В пределах данной экспозиции часто формируются породы с температурой около  $\pm 0$  °С.

#### **Анализ теплового инфракрасного излучения участка исследования с натурными данными**

Как отмечалось ранее, под действием вышеуказанных факторов изменяется температура пород, от которой в свою очередь зависит мерзлое или талое их состояние, что находит отражение в интенсивности теплового инфракрасного излучения поверхности (радиационной температуры). Как показал сопряженный анализ геотермических данных с данным параметром, меньшая интенсивность (низкие значения) радиационной температуры характерны для мерзлых пород, с повышением интенсивности данного параметра температура пород повышается и, соответственно, высокие значения радиационной температуры детектируют талые породы. Характер изменчивости радиационной температуры в идентификации мерзлых и талых пород и методика выявления мерзлых и талых пород с использованием данного параметра наряду с комплексом физиономических ландшафтных факторов описан в [Калиничева и др., 2017].

На рис. 1 представлена карта радиационной температуры в районе исследования. Сопоставление геотермических данных по скважинам и значений теплового инфракрасного излучения поверхности в районе Тарыннахского месторождения показало (табл.), что значения радиационной температуры от 8 °С и ниже идентифицируют многолетнемерзлые породы, а радиационной температурой 9–12 °С фиксируются талые породы. Переходная радиационная температура 8–9 °С отражает породы с переходной температурой ( $\pm 0$  °С). Участки с каменными развалами (курумы), под которыми развиваются мерзлые породы, фиксируются в разных ландшафтных условиях высокими значениями радиационной температуры (9–20 °С) из-за интенсивного прогревания их поверхности в теплый сезон.

Рассмотрим подробнее, наряду с анализом формирующих температуру пород физико-географических факторов.

Самые минимальные значения радиационной температуры ( $< 5$  °С) наблюдаются на крутых и реже средних склонах наветренных экспозиций. На данных участках лишенных растительности снег имеет минимальные значения (10–40 см), местами фиксируются средние мощности снега (40–90 см) на участках с лиственничным лесом. В первом случае минимальные мощности снега, а в последнем, значительная затененность склона формируют суровые мерзлотные условия (скв. 106).

Далее повышение значения радиационной температуры (5–6°) в области развития мерзлых пород (скв. 116) связано смягчением влияющих на температуру пород физико-географических факторов. Так, данные участки с радиационной температурой 5–6° характерны на участках наветренных склонов и реже северо-восточной экспозиции преимущественно со средним уклоном. Последний фактор (уклон склона) обуславливает некоторое повышение приходящей солнечной радиации, но его, как правило, на склонах данных экспозиций недостаточно для формирования положительных среднегодовых температур пород.

Участки с значением радиационной температурой 6–7 °С отмечаются на верхних частях склонов наветренных и северо-восточной экспозиций с преимущественно пологим уклоном (скв. 49, 79). Формирование здесь минимальных (10–40 см), реже средних (40–90 см)

высот снежного покрова на каменных развалах и на густых лиственных лесах и зарослях кедровых стлаников обуславливают формирование на данных участках пород с отрицательной температурой.

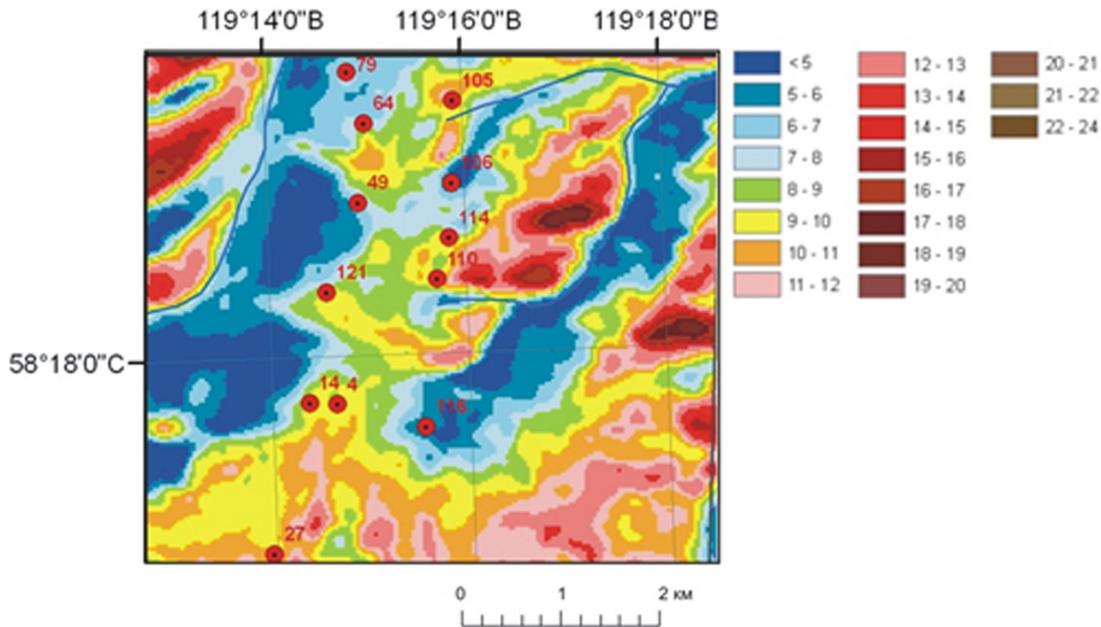


Рис. 1. Радиационная температура (тепловое инфракрасное излучение поверхности) на момент съемки 18.09.2009. Температура в легенде дана в °С

(Точки с цифрами) – номера геотермических скважин

Fig. 1. Radiation temperature (thermal infrared radiation of the surface) at the time of shooting 18.09.2009. The temperature in the legend is given in °С

(Points with numbers) – numbers of geothermal wells

Некоторые участки водораздела и приводораздельные пространства различных экспозиций (наветренных, северо-восточной и восточной) с очень пологим и пологим уклоном характеризуются значением радиационной температуры 7–8 °С. Здесь также отмечается развитие мерзлых пород (скв. 64). Более высокие значения радиационной температуры по сравнению с предыдущими связаны с увеличением количества приходящей солнечной радиации. Однако по разным обстоятельствам породы здесь имеют отрицательную температуру. Так, на наветренных экспозициях и местами в северо-восточных склонах почти повсеместно залегают каменные развалы, которые, как отмечалось выше, сильно охлаждаются в зимнее время. Отрицательные температуры на восточной и северо-восточной экспозициях связаны с охлаждающим влиянием снежников – снег своим поздним сходом снижает среднегодовую температуру пород.

Далее радиационная температура со значениями 8–9 °С интерпретируется согласно априорным данным, как породы с переходной температурой около 0 °С.

Участки с радиационной температурой 9–12 °С в основном идентифицируют талые породы, которые характерны в основном для подветренных экспозиций. Почти повсеместное развитие талых пород на подветренных склонах обусловлено мощным снежным покровом (в среднем 90–110 см и выше), а в летний период повышенным количеством прямой солнечной радиации. Также радиационной температурой 9–10 °С отмечаются талые породы на очень пологих наветренных экспозициях с максимальной мощностью снежного покрова (90–110 см).

Индикаторы мерзлых пород и таликов (фрагмент)  
Indicators of permafrost and taliks (fragment)

Ландшафтные индикаторы		Фактические данные по температуре горных пород				Радационная температура (°C)
		Состояние пород	Температура пород (°C)	№ Скважины		
Экспозиция	Рельеф (Н: 700 – 1200 м)	Тип растительного покрова	Снежный покров, см	Состояние пород	Температура пород (°C)	Радационная температура (°C)
	Уклон					
Северо-западная	Пологий (5–10°) Верхняя часть склона	Каменные развалы	10–40	Мерзлые	–3,3	7–8
Северо-западная	Средний (10–15°) Верхняя часть склона	Лиственничные редины с зарослями кедровых стлаников	40–60	Мерзлые	–4,2	6–7
Юго-восточная	Пологий (5–10°) Приповерхностная часть склона	Заросли кедрового стланика	90–110	Талые	0,5	9–10
Юго-восточная	Средний (10–15°) Средняя часть склона	Лиственничные редины с зарослями кедровых стлаников	90–110	Талые	0,7	10–11

Исключение составляют лишь небольшие участки наветренных экспозиций с очень пологим уклоном, где на поверхности залегают каменные развалы, которые в теплые сезоны сильно нагреваются и в виду этого отображаются температурой 9–10 °С. Однако данные участки в зимнее время также сильно охлаждаются и вследствие этого тут формируются породы с отрицательной температурой.

Как отмечалось ранее, на подветренных склонах с ростом уклона растет количество приходящей солнечной радиации. Так, значение радиационной температуры 9–10 °С характерна для пологих склонов подветренных экспозиций (скв. 4, 27, 110), радиационная температура 10–11 °С отображает участки талых пород залегающих преимущественно на средних склонах (скв. 105, 107), а 11–12 °С – на крутых склонах. Исключение составляют, как и повсюду, каменные осыпи (курумы), на которых и в подветренных экспозициях развиваются мерзлые породы.

Представленный в настоящей работе сжатый анализ фактических геотермических данных с выделением влияния каждого ландшафтного фактора (уклона, экспозиции склона, растительности и снежного покрова) и интенсивности радиационной температуры отображает суть разработанного ранее алгоритма – методики выявления мерзлых и талых пород в горных районах криолитозоны.

Алгоритм предусматривает оверлей (наложение) рассмотренных нами отдельных слоев – рельефа, растительности, снежного покрова, радиационной температуры. Суть картографирования мерзлых пород состоит в последовательном картографировании и уточнении границ по выбранным природным факторам. Сочетание рельефа и растительности считается основой картографирования ландшафтов [1978]. А.Н. Федоров [1991] этот принцип использовал при дифференциации различных классификационных единиц мерзлотных ландшафтов.

На ландшафтную основу (сочетание рельефа и растительности) накладываются карты мощности снежного покрова, что уточняет условия промерзания грунтов, формирование и состояние мерзлых пород. Дальнейшее наложение карты радиационной температуры еще раз уточняет состояние ландшафтов, дифференцируя мерзлые и талые горные породы. Так, по результатам исследования, была составлена карта-схема Олекмо-Чарского нагорья (Тарыннахского месторождения) (рис. 2).

ММП преимущественно занимают горнотаежные ландшафты, также распространены на горноредколесных и подгольцовых ландшафтах – занимают 67 % территории исследования.

Талые породы занимают 22 % территории. Развиты также на горноредколесных и подгольцовых ландшафтах.

Породами с переходной температурой ( $\pm 0$  °С) занято 11 % исследуемой территории.

По сравнению с традиционным геокриологическим картографированием по методике В.А. Кудрявцева [Общее мерзлотоведение, 1978], где породы дифференцируются в основном как островные ММП (до 30 % площади), массивно-островные (до 50 % площади), прерывистые (от 50 до 90 %) и т. д., данная методика позволяет конкретно выделить участки с мерзлыми и талыми породами. Однако имеются некоторые ограничения при картографировании по этой методике, это: 1) Выбор сезона (даты) теплового снимка наиболее подходящего для достоверной идентификации состояния пород, который, в свою очередь, зависит от климатических условий исследуемого региона; 2) Устранение теневого эффекта северных склонов гор при выделении типов растительных ассоциаций на материалах спутниковых снимков, например, посредством метода топографической нормализации; 3) Обязательное проведение снегомерных съемок в подобных мерзлотных исследованиях; 4) Выборка репрезентативных геокриологических данных.

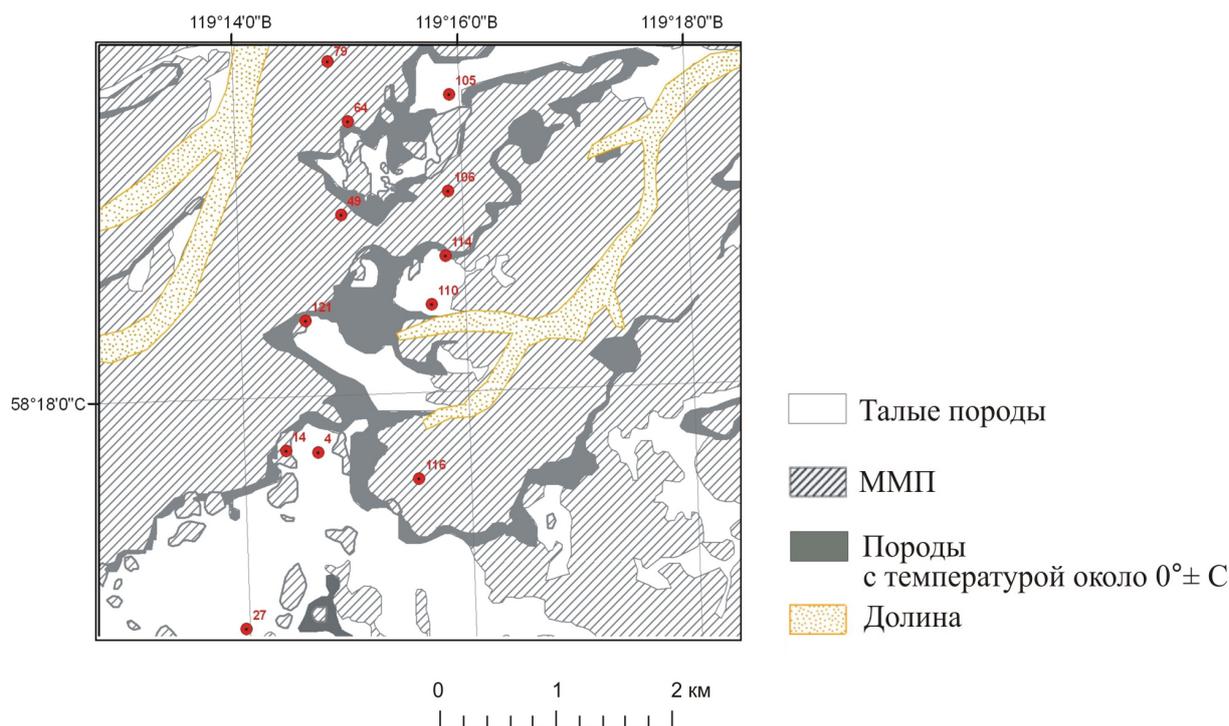


Рис. 2. Фрагмент карты распространения мерзлых пород Олекмо-Чарского нагорья (Тарыннахского месторождения)  
(Точки с цифрами) – номера геотермических скважин

Fig. 2. Fragment of the map of the distribution of permafrost of the Olekma-Char'skiy upland (Tarynnakhskoye deposit)  
(Points with numbers) – numbers of geothermal wells

Несмотря на специфические требования, выделение и картографирование многолетнемерзлых пород с применением теплового инфракрасного снимка достаточно широко используется исследователями разных стран [Westermann et al., 2015; Zhao et al., 2017; etc.], что, в свою очередь, подтверждает актуальность данной методики.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований по предложенной методике в районе Тарыннахского месторождения по комплексу ландшафтных факторов и радиационной температуре были выявлены особенности распространения многолетнемерзлых и талых пород.

Установлено, что интенсивность радиационной температуры изменяется в зависимости от состояния пород (мерзлое или талое) и зависит от влияния комплекса факторов. Так, по тепловому снимку (18.09.2009) талые породы идентифицируются значением радиационной температуры от 9 до 12 °С. Породы с переходной температурой ( $\pm 0$  °С) фиксируются радиационной температурой 8–9 °С, а ММП выделяется радиационной температурой ниже 8 °С (на курумах 9–20 °С).

Повторная апробация разработанной методики подтвердила возможность ее использования для исследования многолетнемерзлых пород в горных районах криолитозоны. Использование этой методики в режиме мониторинга позволит дать качественную информацию об изменении состояния пород криолитозоны горных районов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горный В.И., Шилин Б.В. Применение тепловой аэросъемки для целей инженерно-геологических исследований в районах развития многолетней мерзлоты // Методика инженерно-геол. исслед. и картирования обл. вечной мерзлоты. Якутск, 1978. С. 85–96.
2. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Железняк М.Н., Жижин В.И., Сериков С.И. Геокриологические условия Олекмо-Чарского поднятия в зоне проектируемых линейных сооружений на участке Икабьекан-Тарыннах // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1675.
4. Калинин С.В., Железняк М.Н., Кириллин А.Р., Федоров А.Н. Выявление и картографирование мерзлых участков с использованием космических снимков (на примере Эльконского горста в Южной Якутии) // Наука и образование. 2017. № 3. С. 30–37.
5. Караушева А.И. Климат и микроклимат района Кодар-Чара-Удокан. Л.: Гидрометеопиздат, 1977. 128 с.
6. Корниенко С.Г. Особенности применения теплового метода для изучения и мониторинга мерзлых грунтов // Бурение и нефть. 2007. № 7–8. С. 72–75.
7. Кудрявцев В.А. Температура вечномерзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 182 с.
8. Некрасов И.А., Делеур М.С., Дорофеев И.В., Грибанова С.П. Геокриологическое картирование Южной Якутии по аэрокосмическим снимкам // Региональные и криолитологические исследования в Сибири. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1979. С. 3–16.
9. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 464 с.
10. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
11. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, 1991. 140 с.
12. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 191 с.
13. Westermann S., Ostby T., Gissnas K., Schuler T., Eitzelmüller B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1303–1319. DOI: 10.5194/tc-9-1303-2015.
14. Zhao S., Nan Z., Huang Y., Zhao L. The Application and Evaluation of Simple Permafrost Distribution Models on the Qinghai-Tibet Plateau // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. No 2. P. 391–404.
15. Hachem S., Allard M., Duguay C. Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Quebec and Labrador, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. No 20. P. 407–416.

## REFERENCES

1. Fedorov A.N. Permafrost landscapes of Yakutia: a selection technique and mapping issues. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, USSR, 1991. 140 p. (in Russian).
2. Feldman G.M. Forecast of temperature regime of soils and development of cryogenic processes. Novosibirsk: Science. Sib. Otd-tion, 1977. 191 p. (in Russian).
3. General permafrost studies (geocryology). Ed. V.A. Kudryavtseva. M.: Mosk. University Publ., 1978. 464 p. (in Russian).

4. *Gorny V.I., Shilin B.V.* Application of thermal aerial survey for the purposes of engineering and geological research in the areas of development of permafrost. In: *Technique of Engineering and Geology. Issled. and mapping of the region. permafrost.* Yakutsk, 1978. P. 85–96 (in Russian).
5. *Gorny V.I., Shilin B.V., Yasinsky G.I.* Thermal aerospace survey. M.: Nedra, 1993. 128 p. (in Russian).
6. *Hachem S., Allard M., Duguay C.* Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Quebec and Labrador, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2009. No 20. P. 407–416.
7. *Kalinicheva S.V., Zheleznyak M.N., Kirillin A.R., Fedorov A.N.* Identification and mapping of permafrost using satellite images (on the example of the Elkön mountain in Southern Yakutia). *Science and education.* 2017. No 3. P. 30–37 (in Russian).
8. *Karasheva A.I.* Climate and microclimate of the Kodar-Chara-Udokan district. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 128 p. (in Russian).
9. *Kornienko S.G.* Peculiarities of the application of the thermal method for studying and monitoring permafrost. *Burenie i nef't.* 2007. No 7–8. P. 72–75 (in Russian).
10. *Kudryavtsev V.A.* Temperature of permafrost within the USSR. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 1954. 182 p. (in Russian).
11. *Nekrasov I.A., Deleur M.S., Dorofeev I.V., Gribanova S.P.* Geocryological mapping of Southern Yakutia by aerospace imagery. *Regional and cryolithological studies in Siberia.* Yakutsk: Institute for Permafrost Studies, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1979. P. 3–16 (in Russian).
12. *Sochava V.B.* Introduction to the theory of geosystems. Novosibirsk: Science, 1978. 318 p. (in Russian).
13. *Westermann S., Ostby T., Gissnas K., Schuler T., Etzelmüller B.* A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // *The Cryosphere.* 2015. V. 9. P. 1303–1319. DOI: 10.5194/tc-9-1303-2015.
14. *Zhao S., Nan Z., Huang Y., Zhao L.* The Application and Evaluation of Simpl Permafrost Distribution Models on the Qinghai-Tibet Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2017. No 2. P. 391–404.
15. *Zheleznyak M.N., Zhizhin V.I., Serikov S.I.* Geocryological conditions of the Olekma-Charsky highland in the zone of projected linear structures on the Ikabekan-Tarynnakh section. *Modern problems of science and education.* 2014. No 6. P. 1675 (in Russian).