

Мерзотоведение, инженерная геология

УДК 551.341, 911.52

Выявление и картографирование мерзлых участков с использованием космических снимков (на примере Эльконского горста в Южной Якутии)

С.В. Калиничева*, М.Н. Железняк*, А.Р. Кириллин*, А.Н. Федоров*,**

*Институт мерзотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

**Международный центр BEST Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, 46, Россия
e-mail: ikoveta@rambler.ru

Аннотация. Предложена методика 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 Эльконского горного массива. Приведены результаты корреляционного анализа спутниковых данных с полевыми натурными материалами. Использован метод неконтролируемой классификации для дифференциации типов растительного и снежного покровов с мультиспектральных снимков в программе ArcGis10.1. Впервые более детально охарактеризованы индикационные свойства радиационной температуры (теплового инфракрасного излучения поверхности ландшафта, получаемого с помощью инфракрасной съемки Landsat в канале 6 для выявления и регионального картографирования многолетнемерзлых пород). Составлены алгоритмы распознавания мерзлых и талых участков по каждой экспозиции, представляющие собой схемы комплексной индикации по таким компонентам, как высота, уклон и экспозиция поверхности, растительный и снежный покровы и радиационная температура поверхности. Использование вышеуказанных методов интерпретации космических снимков наряду с традиционными методами позволило выявить комплексные критерии картографирования многолетнемерзлых пород и таликов и составить мерзлотно-ландшафтную карту (фрагмент) Эльконского горного массива.

Ключевые слова: ландшафтная индикация, многолетнемерзлые породы, талики, картографирование, спутниковые снимки, тепловая инфракрасная съемка, Эльконский горст.

Identification and Mapping of Permafrost Using Satellite Images (on the Example of the Elkon Mountain in Southern Yakutia)

S.V. Kalinicheva*, M.N. Zheleznyak*, A.R. Kirillin*, A.N. Fedorov*,**

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, Russia

**International Center BEST, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 46, Kulakovsky Str., Yakutsk, 677000, Russia
e-mail: ikoveta@rambler.ru

Abstract. A technique for identification of permafrost and taliks with use of satellite data is offered and also possibilities of mapping of their distribution in a zone of discontinuous permafrost in mountainous areas of South Yakutia, on the example of the Elkon mountain are shown in the article. The results of the correlation analysis of satellite data with field full-scale materials are presented. The method of unsupervised classification for differentiating vegetation and snow cover types from multispectral imagery is used in the ArcGis10.1

КАЛИНИЧЕВА Светлана Вячеславовна – инженер-исследователь; ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – д.г.-м.н., директор; КИРИЛЛИН Анатолий Русланович – вед. инженер I категории; ФЕДОРОВ Александр Николаевич – к.г.н., зав.лаб.

program. For the first time, the indicator properties of the radiation temperature (thermal infrared radiation from the landscape surface) received by means of the Landsat infrared survey in channel 6 for the detection and regional mapping of permafrost are described in more detail. Algorithms for recognizing permafrost and taliks for each exposure are compiled, representing a complex indication scheme for such components as height, slope and surface exposure, vegetation and snow cover, and surface radiation temperature. Using the above methods of interpreting of satellite images along with traditional methods, allowed to reveal complex criteria for mapping permafrost and taliks and to make the permafrost landscape map (fragment) of the Elkon mountain.

Key words: landscape indication, permafrost, taliks, mapping, satellite images, thermal infrared survey, Elkon mountain.

Введение

Использование метода ландшафтной индикации дает возможность составления мерзлотно-ландшафтных карт с дифференциацией талых и мерзлых горных пород [1–3]. С развитием современных средств исследований, в частности, с появлением многоспектральных спутниковых снимков, открываются дополнительные возможности для распознавания природных объектов.

Актуальность и новизна настоящей работы заключается в применении в геоэкологических исследованиях и картографировании пространственных интерпретаций космических снимков, полученных посредством дифференциации радиационной температуры, растительного и снежного покровов, а также высоты, уклона и экспозиции поверхности.

Результаты геоэкологических и ландшафтных работ по данной территории и сопредельным районам [4–9] позволяют отработать способы применения новых возможностей аэрокосмических методов.

Материалы и методы

В качестве основных материалов для настоящих исследований были использованы данные о температуре горных пород в 45 скважинах, пробуренных глубиной от 15 до 500 м в разных ландшафтных условиях Эльконского горста (база данных лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН). Данные по снежному покрову были проанализированы по материалам снегомерной съемки и режимных наблюдений за динамикой снежного покрова на 34 участках (2014–2015 гг.). В дальнейшем эти данные были интерпретированы с данными дистанционного зондирования Landsat-5/TM.

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [10]. С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности и экспозиции склонов. 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 снимок, полученный 21 августа 2009 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 [11]. Для интерпретации типов растительности и высоты снежного покрова мультиспектральные снимки разделялись на классы по методу неконтролируемой классификации [12].

В качестве исходного снимка для выявления различий распределения высоты снежного покрова с учетом средней даты разрушения снежного покрова на Эльконском горном массиве был взят снимок 6 мая 2005 г. Для расчета радиационной температуры поверхности был выбран снимок 21 августа 2009 г., наиболее отражающий тепловые контрасты на изучаемой территории.

Для интерпретации радиационной температуры были учтены рекомендации выполнения тепловых съемок [13]. Вычисление значений радиационной температуры проводилось по методу, приведенному на сайте [14]. Для пространственно-временного анализа при работе с данными Landsat-5/TM использовались программы Multispec и ArcGis10.1.

Природные условия района

Эльконский горный массив расположен в северной части Алданского щита на границе с Приленским плато. В административном отношении эта территория относится к Алданскому району Республики Саха (Якутия), расположена от 10 до 70 км южнее г. Томмот.

В физико-географическом отношении район исследований относится к Олекмо-Тимптонской

плоскогорной провинции страны гор Южной Сибири [2]. В геолого-тектоническом отношении территория представляет собой совокупность блоковых поднятий, сложенных архейскими, раннепротерозойскими и мезозойскими метаморфическими и магматическими породами. Четвертичные отложения распространены повсеместно на приводораздельных и склоновых участках Эльконского горного массива и имеют мощность до 17 м. Мощность аллювиальных отложений достигает 30–40 м [5]. Рельеф территории низкогорно-среднегорный, расчлененный. Абсолютные отметки водораздельных участков изменяются от 1200 до 1449 м (гора Курунг), на днищах речных долин отметки достигают 540 м (р. Элькон). Абсолютные превышения водоразделов над днищами речных долин составляют от 400 до 900 м.

По климатической классификации [15] район Эльконского горного массива находится в III климатическом поясе (умеренная циркуляция) на стыке двух климатических областей – Континентальной Восточно-Сибирской и Муссонной Дальневосточной. Здесь выпадает сравнительно большое количество осадков для Якутии (от 430 до 700 мм). Средняя годовая температура воздуха изменяется от –6 до –9 °С.

Ландшафтная структура исследуемого района представлена подгольцовым, горноредколесным, среднетаежным и интразональным долинным горнотаежным типами ландшафтов, для которых характерны четыре типа местности: плоскогорно-привершинный, горно-привершинный, горно-склоновый и горно-долинный [16].

Многолетнемерзлые толщи на территории Эльконского горного массива характеризуются значительной пространственной неоднородностью. По распространению преобладают сплошные и прерывистые многолетнемерзлые толщи. Сквозные талики развиты преимущественно в долинах рек и ручьев, на плоских водоразделах (до отм. 1050 м), пологих склонах различных экспозиций. Конусовидные водоразделы гольцов и подгольцовых зон и их крутые склоны полностью проморожены.

Средняя годовая температура пород варьирует от 1,5 до –4,5 °С. Глубина сезонного оттаивания в зависимости от ландшафтных условий изменяется от 0,8 м в замшелых подножьях склонов до 4,5 м на хорошо прогреваемых склонах южной экспозиции.

На территории Эльконского горного массива широкое распространение имеют курумы и каменные развалы. На выположенных водоразделах характерны каменные полосы, многоугольники, кольца и поля с участками выхода на поверхность дисперсного материала. Здесь также

широко развиты осыпи, лавины и снежники на крутых склонах гор, наледи в долинах рек [17].

Результаты и обсуждение

Основными факторами, формирующими мерзлотные условия рассматриваемой территории, являются рельеф (высота местности, уклон и экспозиция склонов), растительный и снежный покровы. Радиационная температура поверхности – один из основных методов индикации мерзлотных условий. Они находят свое отражение на материалах дистанционных съемок. Эти же компоненты ландшафта прямо или косвенно индицируют наличие или отсутствие многолетнемерзлых пород.

Рельеф. Характер рельефа в формировании мерзлых горных пород играет особую роль. Он влияет на температурный режим горных пород через экспозицию и крутизну склонов, высоту над уровнем моря, распределение ландшафтов. Дифференциация рельефа с перераспределением поверхностных четвертичных отложений – долины рек, подножья склонов, наветренные и подветренные склоны, их экспозиции являются основой для изучения распределения мерзлых и талых пород (рис. 1).

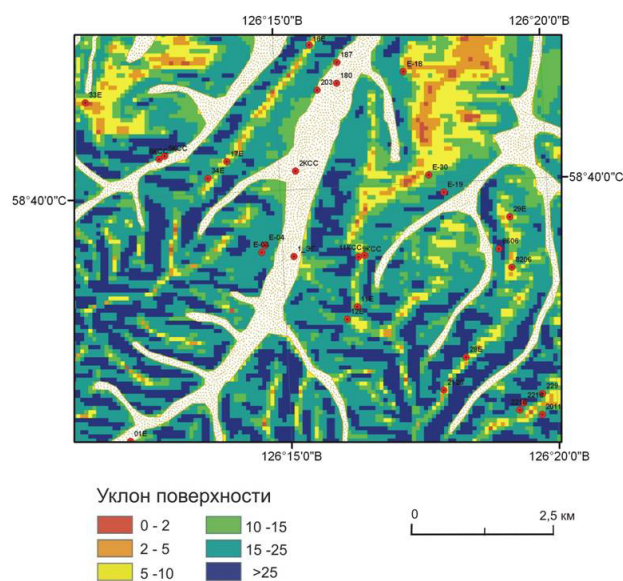


Рис. 1. Карта рельефа Эльконского горного массива. Точки с цифрами – номера геотермических скважин. Склоны: пологий – 2–10°; средний – 10–15°; крутой – 15° и выше

Растительный покров. Выделение типов растительности производилось посредством анализа классов, выделенных по методу неконтролируемой классификации на основе мультиспектрального снимка, обработанного по алгоритму топографической нормализации (рис. 2).

Наибольшей вероятностью развития мерзлых пород обладают лиственничные леса на подножьях

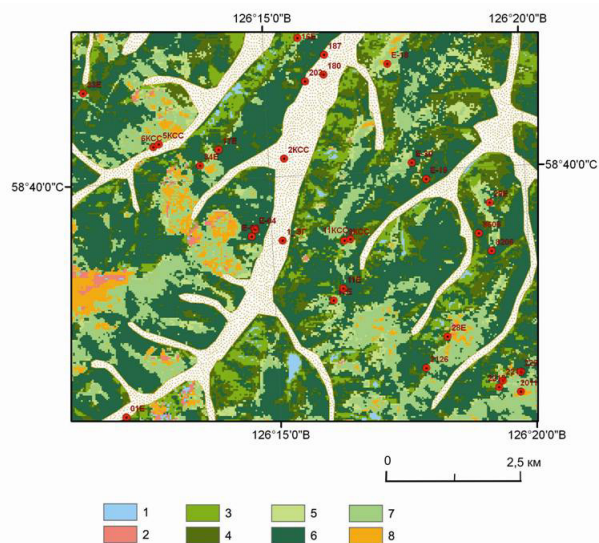


Рис. 2. Дифференциация типов растительности Эльконского горного массива. Точки с цифрами – номера геотермических скважин. 1 – водоемы и водотоки (также местами отражает остаточную тень на нижних частях крутых склонов); 2 – гари и вырубki; 3 – лиственничные леса; 4 – лиственничные редколесья с зарослями кедровых стлаников, лиственничные леса с сосной; 5 – лиственничные редины с ольховником, ерником, разреженным кедровым стлаником; 6 – заросли кедрового стланика с лиственничными рединами, сосново-лиственничные леса; 7 – разреженный кедровый стланик с каменными развалами; 8 – каменные развалы с лишайниками

склонов северных и западной экспозиций, лиственничные редколесья с кедровым стлаником и лишайниковые ассоциации на вершинах гор. 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. Влияние снега на глубину сезонного промерзания и температуру горных пород подробно рассмотрено в работах В.А. Кудрявцева [18], Г.М. Фельдмана [19] и др. Отопляющий эффект снега определяется мощностью и плотностью снежного покрова.

По данным метеостанции Томмот склоны северной, северо-западной, западной экспозиций являются наветренными (максимальная высота снежного покрова от 55 до 90 см), в их пределах преимущественно развиты многолетнемерзлые породы. Склоны же северо-восточной, восточной, юго-восточной, южной и юго-западной экспозиций являются подветренными (высота снежного покрова 90 см и более).

Кроме того, в зависимости от абсолютной высоты, уклона и экспозиции поверхности высота снежного покрова также может изменяться в широких пределах. Так, на вогнутых и плоских водоразделах с абсолютными отметками

700–1100 м и на приводораздельных пологих склонах высота снега в большинстве случаев превышает 100 см. Здесь развиты преимущественно талые породы. Минимальная мощность снежного покрова (менее 50 см) наблюдается на гольцах и крутых наветренных склонах, лишенных кустарниковой растительности, с которых снег сносится ветром.

Авторами выполнены полевые исследования по выявлению особенностей формирования снежного покрова. По полученным данным максимальная мощность снежного покрова наблюдается в марте и изменяется от 50 до 120 см, а его плотность – от 0,19 до 0,51 г/см³.

Для выявления особенностей дифференциации снежного покрова по космоснимку Landsat-5/TM применялся метод неконтролируемой классификации. Скорость схода снежного покрова зависит от его высоты. Результаты полевых исследований показали, что можно выделить 4 группы высоты снега, исходя из дифференциации его изображения на космоснимках (рис. 3).

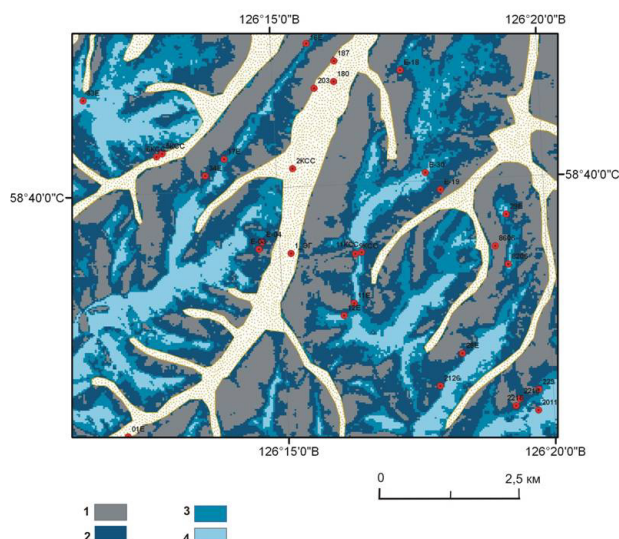


Рис. 3. Распределение снежного покрова Эльконского горного массива (верховья рр.Элькон и Курунг) по данным КС Landsat-5/TM за 6.05.2005 г.: синтез каналов 4–3–2. Точки с цифрами – номера геотермических скважин. 1 – участки уже оттаявшие и почти оттаявшие (снежный покров высотой 50–80 см); 2 – участки быстро подтаивающие (снежный покров высотой 80–100 см); 3 – участки медленно подтаивающие (снежный покров высотой 100–120 см); 4 – участки с устойчивым снежным покровом (снежный покров 120 см и более)

Снег мощностью 50–80 см характерен в основном для нижних частей крутых склонов наветренных экспозиций, где развиты многолетнемерзлые породы. Данная высота снега реже характерна и для крутых склонов подветренных экспозиций. Однако в отличие от первых на участках распространения последних, породы в

основном талые, что объясняется большой суммой приходящей солнечной радиации. Мощность снега 80–100 см характерна для средних и крутых склонов разных экспозиций, где талое или мерзлое состояние пород также определяется суммой приходящей солнечной радиации. Высота снега 100–120 см характерна для приводораздельных участков разных экспозиций, где развиты преимущественно талые породы, реже мерзлые. Снег высотой 120 см покрывает водораздельные участки, где в основном распространены талые породы.

Радиационная температура (тепловое инфракрасное излучение поверхности). Существующие немногочисленные отечественные и зарубежные работы [20, 21] показывают, что данный параметр начинает использоваться в исследованиях криолитозоны.

Сканирующий радиометр ТМ спутника Landsat-5/TM получает тепловое излучение объектов земной поверхности в инфракрасном диапазоне 10,40–12,50 мкм (канал 6) с разрешением 120 м. Тепловизионной съемкой фиксируют собственное тепловое излучение объектов земной поверхности, что дает возможность оценивать состояние ландшафтов, на основе которых можно разделять мерзлые породы от талых.

По выбранному нами снимку (от 21 августа 2009 г.) на момент съемки для исследуемой территории были получены пределы изменчивости радиационной температуры от 9 до 26 °С. Анализ карты радиационной температуры (рис. 4) совместно с данными полевых мерзлотных исследований показывают, что при прочих равных условиях интенсивность теплового излучения

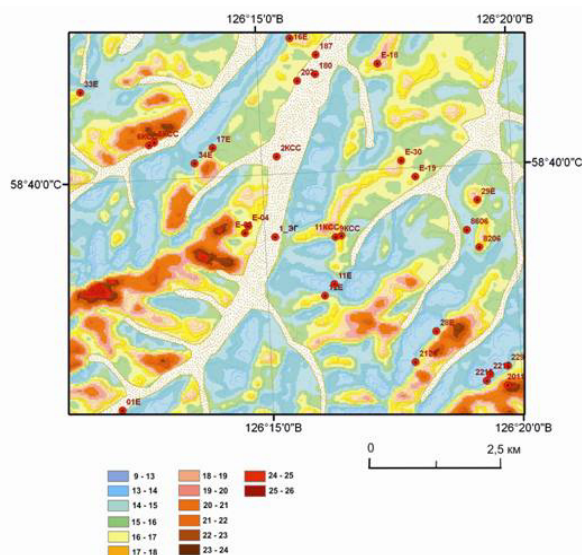


Рис. 4. Радиационная температура (тепловое инфракрасное излучение поверхности) на момент съемки 21.08.2009. Температура в легенде дана в °С. Точки с цифрами – номера геотермических скважин

областей развития многолетнемерзлых пород, как правило, ниже (9–15 °С), чем у ландшафтов, развитых на талых породах (16–19 °С). Однако на участках развития курумов радиационная температура в летний период оказывается выше, чем на таликах (17–26 °С). Это объясняется тем, что обнаженные горные породы нагреваются сильнее участков с растительностью.

Для составления алгоритма распознавания мерзлых и талых пород была построена ландшафтно-криоиндикационная таблица (таблица). Затем были составлены алгоритмы распознавания мерзлых и талых участков для каждой экспозиции (рис. 5). Алгоритм предусматривает оверлей (наложение) рассмотренных нами отдельных слоев – рельефа, растительности, снежного покрова, радиационной температуры, по которым нами были составлены цифровые карты. Суть картографирования мерзлых пород состоит в последовательном картографировании и уточнении границ по выбранным природным факторам. Сочетание рельефа и растительности считается основой картографирования ландшафтов [22]. А.Н. Федоров [23] 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.

Представленная методика определения и картографирования многолетнемерзлых пород с учетом ландшафтных факторов и методов дистанционного зондирования составлена на основе использования полевых мерзлотных исследований на Эльконском горсте и позволяет более точно определить пространственное распространение многолетнемерзлых пород (рис. 6).

На склонах северной и северо-западной экспозиций ММП распространены почти на всех участках, за исключением пологих склонов с лесным массивом с низкой сомкнутостью крон, мощным снежным покровом (100 см и более) и радиационной температурой от 16 до 17 °С, где развиты талые породы.

На склонах западной экспозиции ММП распространены на всех участках с высотой снега до 100 см (их радиационная температура 13–15 °С), а также на курумах, радиационная температура которых составляет 17–19 °С. Талики развиты на участках, где мощность снежного покрова составляет 100 см и более, а их радиационная температура равна 15–18 °С.

ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ УЧАСТКОВ

Ландшафтные индикаторы мерзлых пород и таликов (фрагмент)

Ландшафтные индикаторы						Фактические данные по температуре горных пород			Радиационная температура, °С
Рельеф (Н 700–1200 м)		Растительный покров		Снежный покров, см		состояние пород	температура пород, °С	№ скважины	
экспозиция	уклон	номера типов на рис.2	тип растительности	номера классов на рис.3	высота				
Северо-западная	Пологий (5–10°) <i>(приводораздельная часть)</i>	4	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником	2	80–100	Мерзлые	–1,4	2126	14–15
Северо-западная	Средний (10–15°) <i>(приводораздельная часть)</i>	6	Заросли кедрового стланика	2	80–100	Мерзлые	–1,5	229	13–14
Северо-западная	Крутой (15–25°) <i>(верхняя часть склона)</i>	4	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником	2	80–100	Мерзлые	–3,3	2215	9–13
Юго-восточная	Пологий (5–10°) <i>(приводораздельная часть)</i>	6	Заросли кедрового стланика	3	100–120	Талые	1,1	8206	17–18

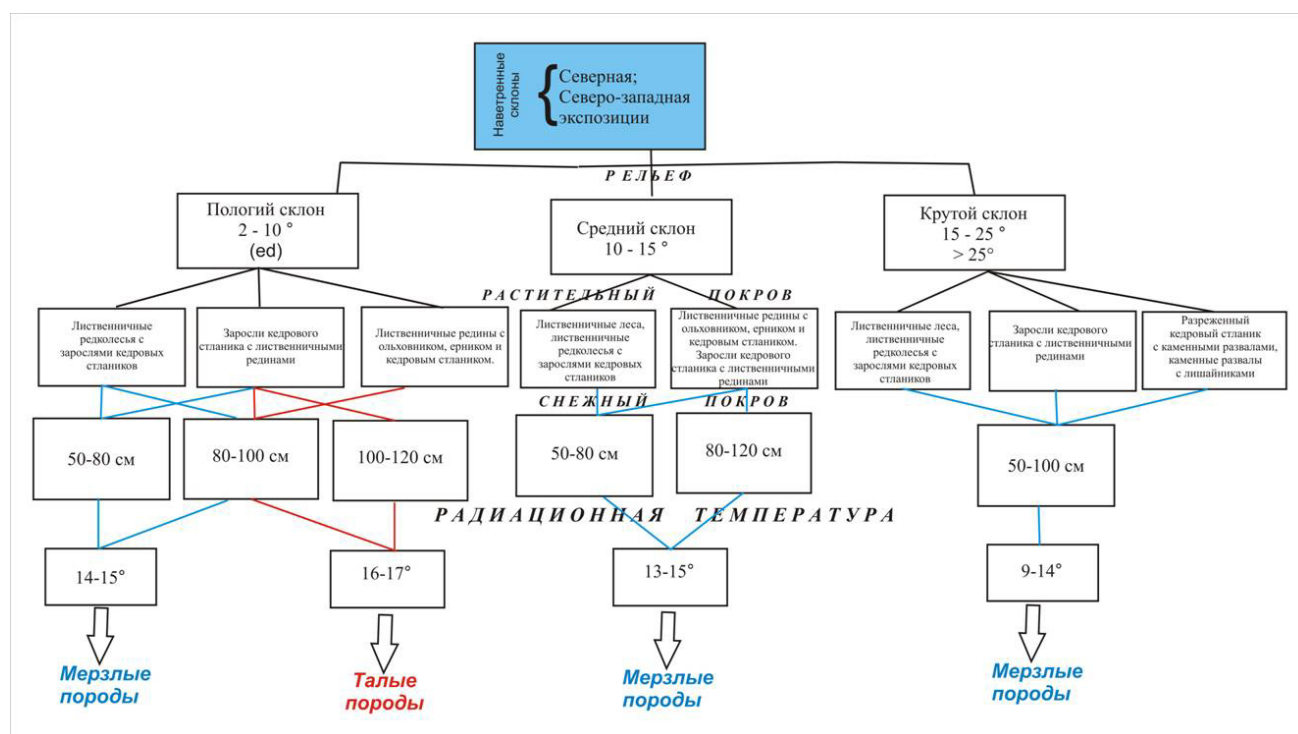


Рис. 5. Пример построения алгоритма выявления массивов мерзлых пород и таликов для наветренных склонов северной и северо-западной экспозиций

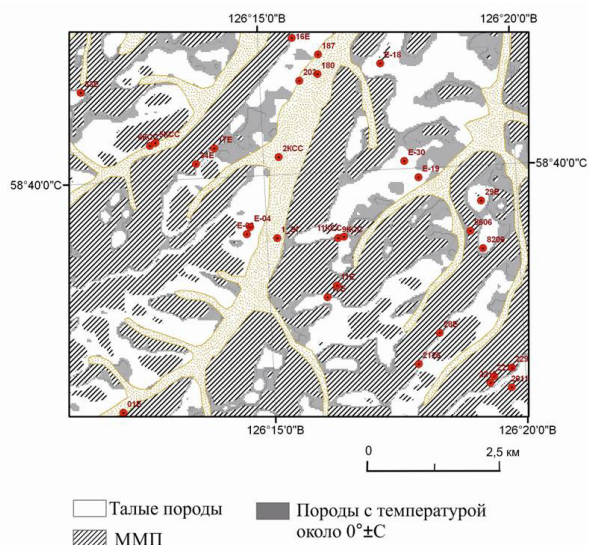


Рис. 6. Фрагмент карты распространения мерзлых пород Эльконского горного массива. Точки с цифрами – номера геотермических скважин

Склоны северо-восточной экспозиции являются переходными от наветренных к подветренным. В связи с этим данная экспозиция имеет ряд особенностей. Здесь на участках с разреженной растительностью снег имеет высоту более 120 см. Малый приток солнечной радиации, но высокая мощность снега приводят к формированию температур пород, близких к 0 °С. Радиационная температура таких участков равна 15–16 °С.

На пологих и средней крутизны склонах с густой растительностью и мощностью снега менее 100 см распространены массивы мерзлых пород. Их радиационная температура составляет 14–15 °С.

Склоны восточной и юго-восточной экспозиций характеризуются накоплением мощного снежного покрова. Здесь развиты талики. Однако на участках с густой растительностью и высотой снежного покрова менее 100 см встречаются массивы мерзлых пород (их радиационная температура составляет 14–15 °С). Курумы и каменные россыпи также характеризуются развитием мерзлых пород.

Отличительной особенностью склонов южной и юго-западной экспозиций является то, что в их пределах массивы многолетнемерзлых пород распространены крайне редко, встречаясь лишь на крутых коллювиальных склонах с каменными развалами.

Заключение

Проведенные работы с использованием космоснимков и материалов детальных полевых исследований, в первую очередь анализа распределения снежного покрова и радиационной температуры на ключевых участках Эльконского горного мас-

сива, позволили выявить особенности распространения многолетнемерзлых пород и таликов.

Выявленные количественные критерии разделения снежного покрова по высоте с учетом его мощности и разных дат схода, фиксирующегося на весенних космоснимках, показали возможность учета этого фактора при геокриологическом картировании. Использование теплового канала спутника Landsat-5, фиксирующего тепловое инфракрасное излучение дневной поверхности, позволило получить радиационную температуру и дополнить характеристику ландшафтов этим параметром.

Интерпретация космических снимков по дифференциации снежного покрова и радиационной температуры поверхности позволит более детально проводить геокриологическое картографирование труднодоступных районов. По итогам работ составлена мерзлотно-ландшафтная карта Эльконского горного массива.

Работа выполнена в рамках базовых проектов СО РАН VIII.69.2.3 и VIII.77.2.2.

Литература

1. Мельников Е.С. Принципы составления прогнозных ландшафтно-индикационных карт и инженерно-геокриологических карт / Е.С. Мельников, Н.Г. Москаленко, В.Л. Невечеря // Геокриологический прогноз для Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. С. 106–109.
2. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. Масштаб 1:2 500 000 / Под общ. ред. П.И. Мельникова. М.: ГУГК, 1991. 2 л.
3. Карта природных комплексов севера Западной Сибири для целей геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий при массовом строительстве. Масштаб 1:1 000 000 / Отв. ред. Е.С. Мельников, Н.Г. Москаленко. М.: Госгеодезия СССР, 1992.
4. Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М.: Наука, 1965. 230 с.
5. Южная Якутия / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1975. 444 с.
6. Железняк М.Н. Геокриологические условия Эльконского горста / М.Н. Железняк, И.В. Дорофеев, С.И. Сериков, Е.А. Осипов // Научное обеспечение реализации мегапроектов Республики Саха (Якутия). Якутск: Компания «Дани Алмас», 2009. С. 67–72.
7. Железняк М.Н. Температура горных пород и особенности распространения криолитозоны Эльконского горста / М.Н. Железняк, С.И. Сериков, В.И. Жижин, Е.А. Осипов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2012. Т. IX, №2. С. 57–65.

8. *Горохов А.Н.* Оценка техногенной нарушенности ландшафтов Эльконского ураново-рудного района // Наука и образование. 2011. №4. С. 54–58.

9. *Гаврильев Р.И.* Теплофизические свойства основных типов пород Эльконского горного массива / Р.И. Гаврильев, М.Н. Железняк, В.И. Жижин, А.Р. Кириллин, А.Ф. Жирков, А.В. Пазынич // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 3. С. 76–82.

10. *CGIAR - CSI* [Электронный ресурс] // URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> – 01.12.2013.

11. *Per aspera ad astra* [Электронный ресурс] // <http://www.giscraft.ru/methods/method9.shtml> – 18.09.2013.

12. *ArcGIS Resources*: сайт Esri [Электронный ресурс] // <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//009z000000pn000000>. – 10.09.2013.

13. *Горный В.И.* Тепловая аэрокосмическая съемка / В.И. Горный, Б.В. Шилин, Г.И. Ясинский. М.: Недра, 1993. 128 с.

14. *GIS-Lab* [Электронный ресурс] // URL: <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>. – 25.09.2013.

15. *Мячкова Н.А.* Климат СССР. М.: Изд-во МГУ, 1983. 192 с.

16. *Мерзлотные ландшафты Якутии* (Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1:2 500 000») /

А.Н. Федоров, Т.А. Ботулу, С.П. Варламов и др. Новосибирск: ГУГК, 1989. 170 с.

17. *Сериков С.И.* Криогенные процессы в современном рельефообразовании Эльконского горного массива / С.И. Сериков, М.Н. Железняк, В.И. Жижин // Наука и образование. 2012. №1. С. 40–44.

18. *Кудрявцев В.А.* Температура вечномерзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 182 с.

19. *Фельдман Г.М.* Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск: Наука, 1977. 191 с.

20. *Георгиевский Б.В.* Дистанционное геотермическое картографирование арктических регионов // Земля из космоса. 2011. № 10. С. 60–65.

21. *Hachem Sonia.* Using the MODIS Land Surface Temperature Product for Mapping Permafrost: An Application to Northern Quebec and Labrador, Canada / Sonia Hachem, Michel Allard, Claude Duguay // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. № 20. P. 407–416.

22. *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.

23. *Федоров А.Н.* Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1991. 140 с.

Поступила в редакцию 02.08.2017