

С.В. Калиничева, Н.Н. Никифорова, Н.А. Максимов, И.Е. Мисайлов, А.Н. Федоров
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАСТУПЛЕНИЯ ЛЕСА НА ТУНДРУ В РЕГИОНЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. В статье приведены исследования, проведенные в зоне тундры и лесотундры в Анабарском районе с использованием данных дистанционного зондирования и топографических карт. С применением топографических карт 1950 и 1973 гг., а также современных спутниковых снимков Landsat-8, а также аэрофотоснимков с источников Google, Esri, полученных посредством программы SASPlanet, нами были выявлены ареалы зарастания тундры лесом. По мере потепления климата все дальше на север сдвигается граница лесов – тундра вытесняется лесом, что подразумевает также изменение геоэкологических условий территории. На основе полученных нами данных во время полевых работ в рассматриваемом районе было выявлено влияние растительного покрова на глубину сезонно-талого слоя и температуру пород на глубине подошвы годовых теплооборотов 7-8 м. Так, по результатам исследования было установлено, что глубина сезонно-талого слоя имеет наибольшую глубину на участке тундры, с увеличением лесистости сезонно-талый слой уменьшается, а температура грунтов на подошве годовых теплооборотов, напротив, имеет низкие значения в тундре, а в лесотундре температура мерзлых пород выше. В исследовании применен метод тепловой инфракрасной съемки (радиационная температура), который отражая ландшафтные условия местности (при определенном выборе времени съемки) может служить одним из достоверных критериев в выделении пород с разными геоэкологическими условиями. Интерпретация космических снимков по дифференциации радиационной температуры поверхности позволило отобразить породы с разными геоэкологическими характеристиками по типам ландшафта. В настоящей работе представлены результаты первого этапа исследования. В рассматриваемой территории планируются дальнейшие мониторинговые исследования.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, мерзлотные ландшафты, тундра, лесотундра, температура грунтов на подошве годовых теплооборотов, сезонно-талый слой, картографирование, спутниковые снимки, данные дистанционного зондирования, тепловая инфракрасная съемка, радиационная температура.

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

KALINICHEVA Svetlana Vyacheslavovna – Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: ikoveta@rambler.ru

НИКИФОРОВА Ньургуйана Николаевна – м.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: nurguyana_93@mail.ru

NIKIFOROVA N'urguyana Nikolaevna – Junior researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: nurguyana_93@mail.ru

МАКСИМОВ Николай Афанасьевич – инженер, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: maksimov_nikolay_1996@mail.ru

MAKSIMOV Nikolay Afanasevich – Engineer, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: maksimov_nikolay_1996@mail.ru

МИСАЙЛОВ Иван Евгеньевич – научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: ventura-83@mail.ru

MISAILOV Ivan Evgenievich – Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: ventura-83@mail.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич – д.г.н., в.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

FEDOROV Alexander Nikolaevich – Doctor of Geographical Sciences, Leading researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. E-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

S.V. Kalinicheva, N.N. Nikiforova, N.A. Maksimov, I.E. Misailov, A.N. Fedorov
Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

INVESTIGATION OF THE FOREST ATTACK ON THE TUNDRA IN THE EASTERN SIBERIA REGION IN A CHANGING CLIMATE USING GIS AND EARTH REMOTE SENSING DATA

Abstract. The article presents studies carried out in the tundra and forest-tundra zones in the Anabar region using remote sensing data and topographic maps. Using topographic maps of 1950 and 1973, modern satellite images Landsat-8, as well as aerial photographs from Google and Esri sources, obtained through the SASPlanet program, we identified areas of overgrowth of the tundra with forest. As the climate warms, the forest boundary is shifting further to the north: the tundra is being forced out by the forest, which also mean a change in the permafrost conditions of the territory. Based on the data we obtained during a field work in the area under consideration, the influence of the vegetation covers on the depth of the seasonally thawed layer and the ground temperature at the depth of zero annual amplitude of 7–8 m was revealed. So, according to the study results, it was found that the depth of the seasonally thawed layer has the greatest depth in the tundra area, with an increase in forest cover, the seasonally thawed layer decreases, and the ground temperature at the depth of zero annual amplitude, on the contrary, has low values in the tundra, and in the forest-tundra frozen ground above. In the study, the method of thermal infrared survey (radiation temperature) was applied, which, reflecting the landscape conditions of the area (with a certain choice of survey time), can serve as one of the reliable criteria in identifying ground with different permafrost conditions. The interpretation of satellite images based on the differentiation of the surface radiation temperature made it possible to show ground with different permafrost characteristics by landscape types. This article presents the results of the first stage of the study. Further monitoring studies are planned in the area under consideration.

Keywords: geographic permafrost, permafrost landscape, tundra, forest-tundra, ground temperature at the depth of zero annual amplitude, seasonally thawed layer, mapping, satellite imagery, remote sensing data, thermal infrared survey, radiation temperature.

Введение

Тундровые ландшафты, отличающиеся повышенной льдистостью, являются наиболее чувствительными к потеплению климата и к техногенному воздействию. По мере потепления климата все дальше на север сдвигается граница лесов – тундра вытесняется лесом, что подразумевает также изменение геоэкологических условий территории. В связи с этим возникает необходимость проведения мониторинговых исследований в тундровой зоне, что позволит контролировать развитие природной среды в зависимости как от естественных факторов (например, климатических), так и техногенных воздействий.

Свидетельства о смещении северной границы лесов на север (не только на территории Евразии, но и на Аляске) стали появляться с 30-х годов 20-го столетия в работах разных исследователей. Одной из первых этот процесс подметила и подробно описала для бассейнов Анадыря и Хатанги Л.Н. Тюлина [1-2]. Несколько позже В.С. Говорухин [3] делает следующее обобщение, в той или иной мере разделяемое сейчас многими исследователями: «Постепенное завоевание полярных пустынь тундрой, зарастание тундры редколесьями, облесение лесотундры тайгой и т. д. – вот некоторые важнейшие этапы наступления растительности на безжизненные пространства равнин и гор Крайнего Севера». Точку зрения наступления леса на тундру разделял В. Р. Вильямс [4], но объяснял он его не потеплением климата, а саморазвитием тундровых ландшафтов в лесные. Очевидно, подобное явление действительно может наблюдаться, но лишь в немногих геологически молодых, с тенденцией к поднятию, участках лесотундровой зоны, испытывающих в настоящее время эрозийное расчленение [5].

Исследование проводилось нами на границе тундры и лесотундры в районе Анабарского улуса (около с. Саскылах). Несмотря на то, что проблема наступления леса на тундру является актуальной и учеными по всему миру исследуется достаточно активно [6-9 и др.], однако, рассматриваемая территория является «белым пятном» во всей Циркумполярной области, т.к. ранее здесь не проводились мониторинговые исследования изменения мерзлотно-ландшафтных условий. Еще одним важным моментом для проведения исследований является то, что темпе-

ратура пород и глубина сезонно-талого слоя (СТС) в зоне тундры и лесотундры в зависимости от ландшафта и изменения ареала растительности на сегодняшний день, изучены недостаточно в виду отсутствия фактических полевых данных.

При оценке пространственной дифференциации природной среды необходимым инструментом служат спутниковые снимки, возможность и актуальность использования которых обуславливается их доступностью, большим пространственным охватом и современными методами их обработки.

Основная цель работы состоит в оценке характера пространственно-временных изменений границы леса в условиях изменений климата на рассматриваемой территории с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и его влияния на мерзлотные условия.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для оценки изменения границы леса, в виду отсутствия ранних (до 1999 г.) космоснимков на исследуемой территории, послужили топокарты 1950 [10] и 1973 гг. [11]. Для изучения современного состояния растительного покрова использовались космоснимки Landsat-8/OLI (каналы 1–9 с разрешением 30 м), а также снимки с источников Google, Esri, полученные посредством программы SASPlanet.

Для исследования применялся метод тепловой инфракрасной съемки – параметр радиационная температура поверхности ландшафта (тепловое инфракрасное излучение), который отражая ландшафтные условия местности (при определенном выборе времени съемки) может служить одним из достоверных критериев в выделении пород с разными геоэкологическими условиями. Данный критерий ранее нами применялся при исследовании мерзлых и талых в горных районах Южной Якутии [12, 13]. Для расчета радиационной температуры поверхности был выбран снимок 1 августа 2020 г. (в этот период исходя из природных условий рассматриваемой территории сезонно-талый слой достигает максимальных значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает). Вычисление значений радиационной температуры проводилось по методу, приведенному на сайте [14].

Для пространственно-временного анализа при работе с данными Landsat-8 использовалась программа ArcGis10.1. В работе для выделения высоты местности, уклона и экспозиции склона, также, применялись данные ArcticDEM [15].

Фактическими материалами для настоящего исследования послужили полученные нами в ходе полевых исследований данные по глубине сезонно-талого слоя и температуре пород, измеренные на подошве годовых теплооборотов (табл.), а также, ландшафтные описания на трех участках – в тундре, лесотундре – на участке молодого и коренного леса.

Таблица – Данные по глубине сезонно-талого слоя и температуре пород

Ландшафты	Тундра	Лесотундра (молодой лес)	Лесотундра (коренной лес)
Параметры ММП			
СТС, м мин./ср./макс.	0,30/0,87/1,43	0,60/0,75/0,90	0,48/0,70/0,91
T (°C) (на подошве годовых теплооборотов 7-8 м)	-6,4...-6,8 °C	-5,1...-5,8 °C	

Природные условия исследуемой территории

Участком исследования была выбрана территория в зоне тундры и лесотундры с молодым и коренным лесом около с. Саскылах (Анабарский улус). Данная территория исследования находится на северо-западе Якутии за Полярным кругом и имеет следующие координаты – 71°55' – 71°58' с.ш.; 114°06' – 114°07' в.д. (рис. 1).

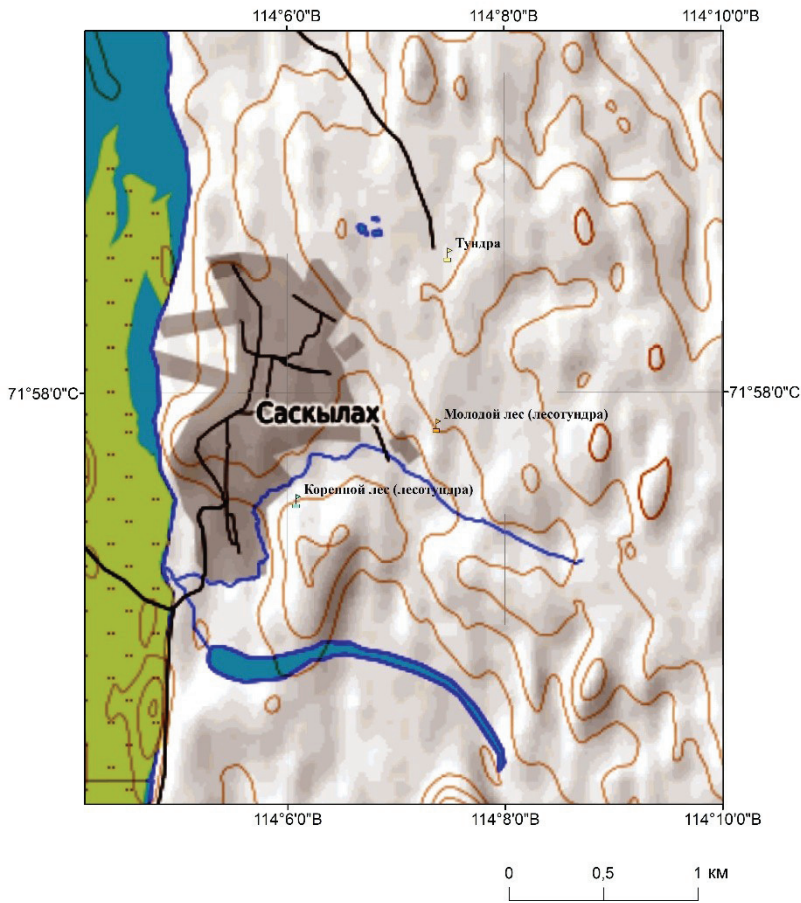


Рисунок 1 – Территория исследования

Одним из основных причин выбора района исследования послужила карта экотона циркулярктической лесотундры [6]. Из 4 представленных на карте регионов в мире (рис. 2) фактических данных очень мало или почти нет в регионе Восточной Сибири. Если на востоке от р. Лены имеются хоть какие-то данные, то западная часть – территория Анабарского района является «белым пятном» во всей Циркумпольярной области, где данные о состоянии мерзлотных ландшафтов отсутствуют.

Климат исследуемой территории характеризуется резко выраженной континентальностью и суровостью. Среднегодовая температура воздуха по гидрометеостанции Саскылах $-14,0^{\circ}\text{C}$, января $-35,1^{\circ}\text{C}$, июня $+5,5^{\circ}\text{C}$, абсолютный минимум -58°C , максимум $+36^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков 228 мм за год, из них около 140-150 мм в теплое время года [16].

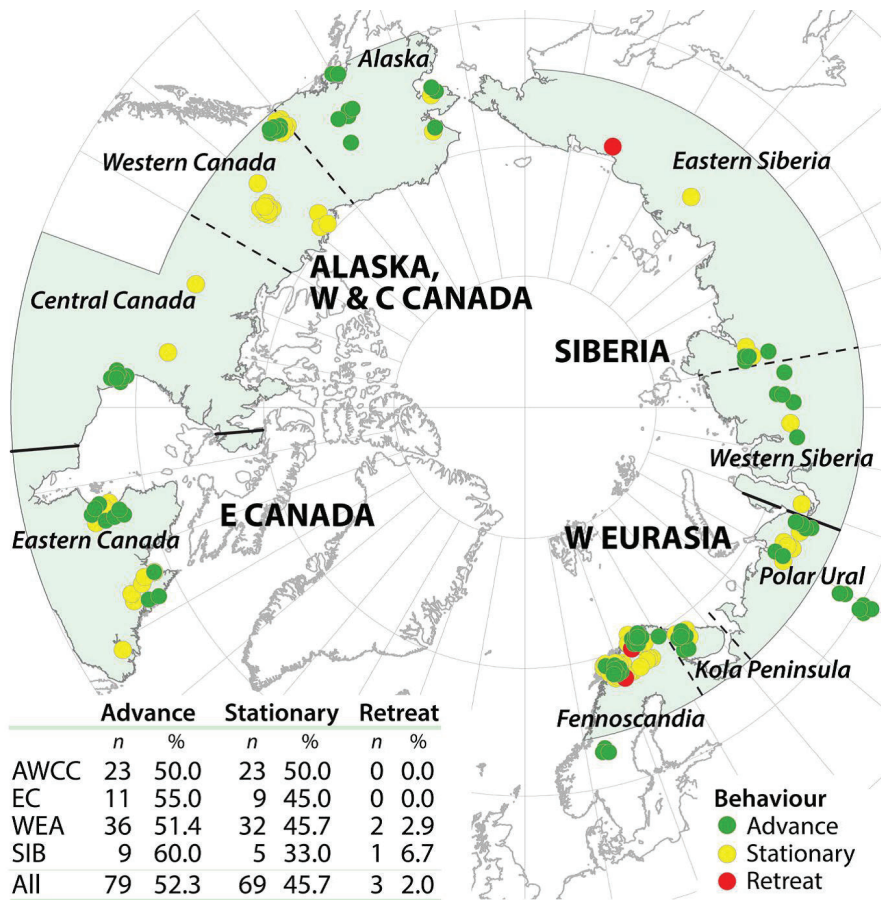


Рисунок 2 – Расположение участков и районирование качественных данных о поведении экотона циркулярктической лесотундры (цветными кружками на карте обозначены поведение экотона циркулярктической лесотундры – наступление, отступление или неизменное состояние; пунктирные линии и курсивный шрифт показывают девять географических областей, жирные линии и крупный шрифт показывают четыре региона Циркулярктической области)

В рельефе северная часть территории представлена однообразной пологохолмистой Оленекско-Анабарской низменностью с малыми абсолютными высотами 50-60 м, а местами – 100-150 м. Современный рельеф низменности образовался в результате эрозионной деятельности. Особенно большую роль эрозия сыграла в образовании долин рек. Вблизи Анабарского массива встречаются моренные образования, а в местах, незакрепленных растительностью – эоловые холмы и гряды. Вдоль южного края низменности выделяется ряд столовых возвышенностей (до 200 м), которые представляют собой выходы траппов. Плоская равнина к западу от р. Анабара высотой 60-70 м с редкими холмами испещрена многочисленными озерными котловинами. Южная часть рассматриваемого района представляет собой плоскогорье со средними высотами 200-300 м [17].

Ландшафтная структура исследуемой территории представлена тундровыми и лесотундровыми типами ландшафтов. Тундровые ландшафты представляют собой безлесные переувлажненные территории с широким развитием мохово-лишайникового покрова, присутствием низкорослых кустарников и кустарничков, имеющие преобладающее распространение в тундровой зоне в пределах субарктического пояса. Лесотундровые ландшафты являются переходным типом между южной тундрой и северной тайгой и представлены тундровыми комплексами в сочетании с лиственничными рединами и редколесьями [18].

Многолетнемерзлые грунты распространены на всей территории улуса. В ее северной части глубина мерзлых грунтов достигает 400-700 м, а в южной, около с. Саскылах- -1000-1500 м. Для территории исследования характерны такие мерзлотные процессы, как солифлюкция, морозная сортировка, термокарст, пучение и термоэрозия. Мерзлотные процессы, в частности, морозобойное растрескивание грунтов определяют важнейшие черты ландшафтов – формирование полигонально-валикового рельефа [17].

Результаты исследований

Растительный покров играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, участвуя в поглощении радиации и встречном излучении [19]. Изменения растительного покрова вызывают соответствующие изменения теплообмена между почвой и атмосферой, которые отражаются на промерзании, протаивании грунтов и развитии вечной мерзлоты [20].

В Анабарском районе, в окрестностях с. Саскылах можно выделить 5 типов растительных ассоциаций (природно-территориальных комплексов) (рис. 3). Так, в рассматриваемом районе в пойменных частях рек характерны луга, ивняки, редко ольховники; полигонально-валиковые тундроболотные комплексы представлены зарослями ольховника, ивы (красивая и сизая), пушицы влагилищной и осоки прямостоящей; коренной лес характеризуется лиственничными редколесьями голубично-багульниково-брусничными с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом; редкостойные лиственничные леса голубично-багульниково-брусничные с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом составляют молодой лес; тундровый ландшафт представлен кустарничково-травяно-мохово-лишайниковым покровом. В данном исследовании, из вышеперечисленных, нами рассматриваются мерзлотные условия на участке коренного леса и молодых редкостойных лиственничных лесов голубично-багульниково-брусничные с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом, а также тундровый ландшафт.

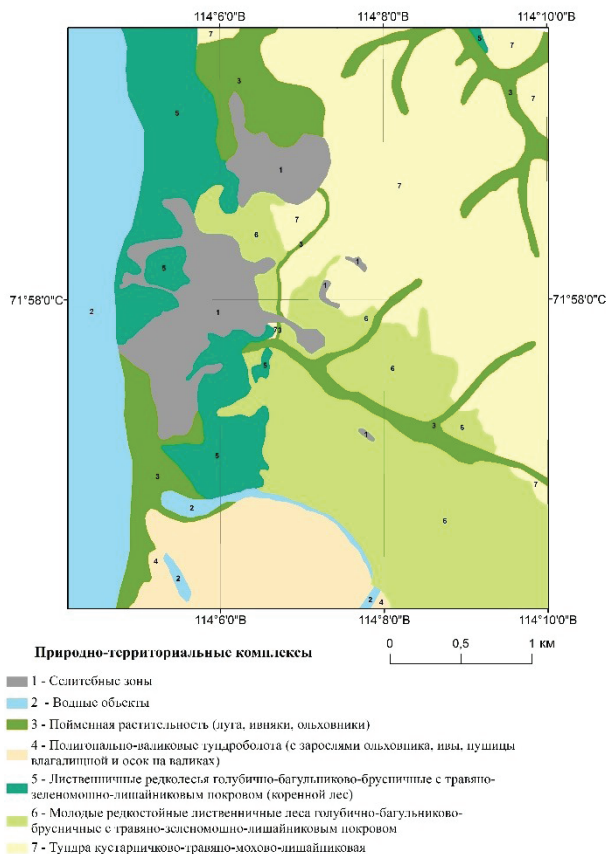


Рисунок 3 – Природно-территориальные комплексы

По анализу топографических карт 1950 и 1973 гг., а также современных спутниковых снимков Landsat-8/OLI нами были выявлены ареалы зарастания тундры лесом (рис. 4).

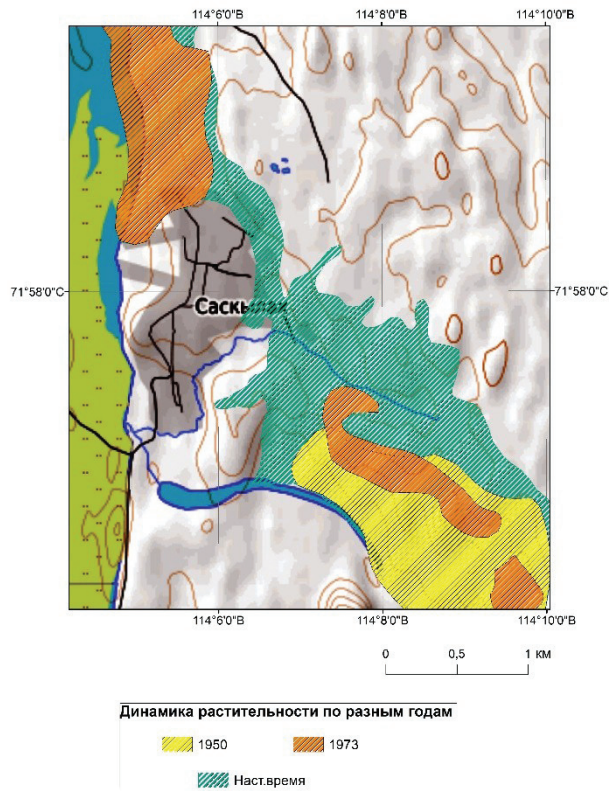


Рисунок 4 – Динамика растительного покрова по разным годам

Динамика растительности на карте (рис. 4) отображено 3 цветами: желтым цветом – ареал растительности по съемке 1950 г., оранжевым – 1973 г., зеленым – современная территория лесотундры. Рост последнего отмечается с 1980-1990 гг.

Влияние леса на температурный режим грунтов. Как известно, на лесных участках высота снежного покрова больше, чем на безлесных открытых участках. За счет увеличения высоты снежного покрова на участке с растительностью среднегодовая температура пород, как правило, выше, чем на безлесных открытых территориях в виду того, что снег обладая высокими теплоизоляционными свойствами, повышает среднюю годовую температуру пород. В целом утепляющий эффект снежного покрова растет с повышением его мощности и уменьшением плотности [21].

В тундре из-за значительной плотности снега и большой отражательной способности, вследствие которого они сильно промерзают и накапливают большой запас холода в течение долгой зимы (территория улуса в течение 8 месяцев – 256 дней находится под снежным покровом) многолетнемерзлые породы имеют более низкую температуру, чем на залесенных участках с более мощным и рыхлым снежным покровом, предохраняющим от потери тепла в холодное время года. Так, в полученных нами данных в ходе полевых работ в зоне тундры температура пород на подошве годовых теплооборотов составляет $-6,6^{\circ}\text{C}$, а в лесотундре $-5,5^{\circ}\text{C}$.

Данный факт подтверждается тепловыми снимками. Так, например, на снимке тепловой инфракрасной съемки (от 1 августа 2021 г.), ландшафты в тундровой зоне отражаются низкими значениями радиационной температуры ($13-14^{\circ}\text{C}$), чем участки с редкостойными лиственнич-

ными лесами (14-16°C). Самое высокое значение радиационной температуры характерно для территории с коренным лесом (15-17 °C) (рис. 5).

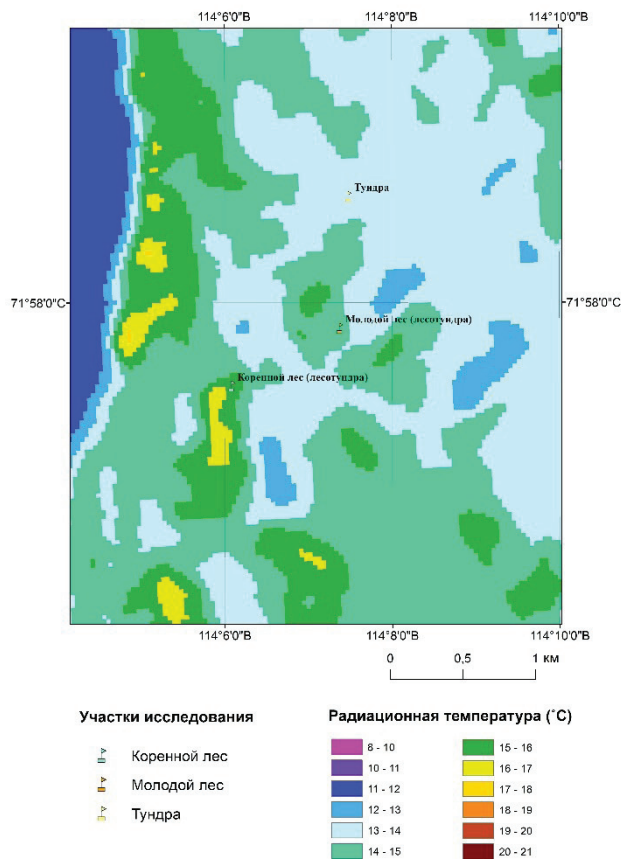


Рисунок 5 – Радиационная температура зоны тундры и лесотундры в районе Анабарского улуса 01.08.2020

Влияние леса на протаивание почвы. Согласно А.П. Тыртикову [20] в редкостойных лесах, преобладающих в Сибири, под крупными деревьями почва протаивает медленнее, чем на прогалинах. Под лесной растительностью в области вечной мерзлоты глубина протаивания почв в среднем два раза меньше, чем на участках, где нет растительного покрова и торфянистых слоев. Так, в исследуемом районе на участке тундры – глубина сезонного протаивания в среднем 87 см, на участке молодого редкостойного леса СТС составляет 75 см, а в коренном лесотундровом лесу – 70 см. Данные измерения наглядно отражают вышеописанную закономерность – в лесотундре глубина СТС почти вдвое меньше, чем на безлесной тундре.

Заключение

Проведенное исследование в районе Анабарского улуса в зоне тундры и лесотундры с применением полевых данных и материалов космической съемки, а также, картографических материалов, позволило выделить ареалы наступления леса на тундру в условиях меняющегося климата, а также выявить влияние растительного покрова на температуру пород и глубину сезонно-талого слоя. Так, по результатам исследования было установлено, что глубина сезонно-талого слоя имеет наибольшую глубину на участке тундры, с увеличением лесистости СТС уменьшается, а температура грунтов, напротив, имеет низкие значения в тундре, а в лесотундре температура мерзлых пород выше.

В настоящей работе представлены результаты первого этапа исследования. В рассматриваемой территории планируются дальнейшие мониторинговые исследования.

Интерпретация космических снимков по дифференциации радиационной температуры поверхности позволило отобразить породы с разными геокриологическими характеристиками по типам ландшафта.

Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН АААА-А20-120111690009-6.

Литература

1. Тюлина Л.Н. О лесной растительности Анадырского края и ее взаимоотношении с тундрой / Л.Н. Тюлина // Тр. Арктического ин-та. – 1936. – том 40. – С. 7-212.
2. Тюлина Л.Н. Лесная растительность Хатангского района у ее северного предела / Л.Н. Тюлина // Тр. Арктического ин-та. – 1937. – Т. 63. – С. 83-180.
3. Говорухин В.С. Бугристые болота Северной Азии и потепление Арктики (Западная Сибирь, бассейн р. Северной Сосьвы) / В.С. Говорухин // Тр. каф. геогр. ф-та. – 1947. – том 9, вып. 4. – С. 106-124.
4. Вильямс В.Р. Почвоведение. Вып. 3: Ледниковые наносы Европейской России и почвенный возраст страны. Тундровая почвенная зона. Почвенный покров лесо-луговой зоны. – М.: Книгоизд-во студентов Моск. сел.-хоз. ин-та, 1919. – С. 232–582.
5. Ойкумена (режим доступа: <http://geo-site.ru/geo/oz/prir/ltyn.html>) дата обращения: 08.09.2021.
6. Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D.M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? // *Global Change Biology*. – 2020. – No 7 (26). – P. 3965-3977.
7. Kreplin H.N., Ferreira C.S., Destouni G., Keesstra S.D., Salvati L., Kalantari. Arctic wetland system dynamics under climate warming // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 8. – 2021. – No 4. doi: 10.1002/wat2.1526.
8. J. Limpens, T. Fijen, I. Keizer, J. Meijer, F. Olsthoorn, A. Pereira, R. Postma, M. Suyker, H. Vasander, M. Holmgren. Shrubs and Degraded Permafrost Pave the Way for Tree Establishment in Subarctic Peatlands // *Ecosystems*. – 2021. – No 24. – P. 370–383. doi: 10.1007/s10021-020-00523-6.
9. Magnússon, R., Limpens, J., Kleijn, D., van Huissteden, K., Maximov, T. C., Lobry, S., Heijmans, M. Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 782. – P. 1-16.
10. Топографическая карта Якутской АССР. Масштаб 1:1 100 000. – М.: ГУГК, 1950.
11. Топографическая карта Якутской АССР. Масштаб 1:1 100 000. – М.: ГУГК, 1973.
12. Калиничева С.В. 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 // *Наука и образование*. – 2017. – № 3. – С. 30-37.
13. Kalinicheva S.V., Fedorov A.N., Zhelezniak M.N. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery // *GEOSCIENCES*. – 2019. -No 9(1). doi:10.3390/geosciences9010004
14. GIS-Lab // (режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>) дата обращения: 29.10.2021.
15. ArcticDEM // (режим доступа: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>). дата обращения: 25.10.2021.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып.24: Якутская АССР, кн.1 Сер.3. Многолетние данные, ч. 1-6. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 607 с.
17. Анабарский улус: История. Культура. Фольклор / Администрация муниц. Образования «Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) улус»; Ин-т гуманитар. исслед. АН РС (Я); Гл.ред. кол. серии В.Н. Иванов (гл. ред.) и др.; Ред. кол.: Боякова С.И. и др. – Якутск: Бичик, 2005. – 232 с.
18. Данилов Ю.Г., Федоров А.Н. и др. Ландшафты Якутии – Якутск: Издат. дом СВФУ, 2016 – 100 с.
19. Общее мерзлотоведение (геокриология). – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
20. Тыртиков, А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1969. – 192 с.
21. Железняк, М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.

References

1. Tjulina L.N. O lesnoj rastitel'nosti Anadyr'skogo kraja i ee vzaimootnoshenii s tundroj / L.N. Tjulina // Tr. Arkticheskogo in-ta. – 1936. -tom 40. – S. 7-212.
2. Tjulina L.N. Lesnaja rastitel'nost' Hatang'skogo rajona u ee severnogo predela / L.N. Tjulina // Tr. Arkticheskogo in-ta. – 1937. – T. 63. – S. 83-180.
3. Govoruhin V.S. Bugristye bolota Severnoj Azii i poteplenie Arktiki (Zapadnaja Sibir', bassejn r. Severnoj Sos'vy) / V.S. Govoruhin // Tr. kaf. geogr. f-ta. – 1947. – tom 9, vyp. 4. – S. 106-124.
4. Vil'jams V.R. Pochvovedenie. Vyp. 3: Lednikovye nanosy Evropejskoj Rossii i pochvennyj vozrast strany. Tundrovaja pochvennaja zona. Pochvennyj pokrov leso-lugovoj zony. – M.: Knigoizd-vo studentov Mosk. sel.-hoz. in-ta, 1919. – S. 232–582.
5. Ojkumena (rezhim dostupa: <http://geo-site.ru/geo/oz/prir/ltyn.html>) data obrashhenija: 08.09.2021.
6. Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D.M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? // *Global Change Biology*. – 2020. – No 7 (26). – P. 3965-3977.
7. Kreplin H.N., Ferreira C.S., Destouni G., Keesstra S.D., Salvati L., Kalantari. Arctic wetland system dynamics under climate warming // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 8. – 2021. – No 4. doi: 10.1002/wat2.1526.
8. J. Limpens, T. Fijen, I. Keizer, J. Meijer, F. Olsthoorn, A. Pereira, R. Postma, M. Suyker, H. Vasander, M. Holmgren. Shrubs and Degraded Permafrost Pave the Way for Tree Establishment in Subarctic Peatlands // *Ecosystems*. – 2021. – No 24. – R. 370–383. doi: 10.1007/s10021-020-00523-6.
9. Magnússon, R., Limpens, J., Kleijn, D., van Huissteden, K., Maximov, T. C., Lobry, S., Heijmans, M. Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 782. – P. 1-16.
10. Topograficheskaja karta Jakutskoj ASSR. Masshtab 1:1 100 000. – M.: GUGK, 1950.
11. Topograficheskaja karta Jakutskoj ASSR. Masshtab 1:1 100 000. – M.: GUGK, 1973.
12. Kalinicheva S.V. Vyjavlenie i kartografirovanie merzlyh uchastkov s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov (na primere Jel'konskogo gorsta v Juzhnoj Jakutii) / S.V. Kalinicheva, M.N. Zheleznyak, A.R. Kirillin, A.N. Fedorov // *Nauka i obrazovanie*. – 2017. – № 3. – S. 30-37.
13. Kalinicheva S.V, Fedorov A.N., Zheleznyak M.N. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery // *GEOSCIENCES*. – 2019. -No 9(1). doi:10.3390/geosciences9010004
14. GIS-Lab // (rezhim dostupa: <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>) data obrashhenija: 29.10.2021.
15. ArcticDEM // (rezhim dostupa: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem>). data obrashhenija: 25.10.2021.
16. Nauchno-prikladnoj spravocnik po klimatu SSSR. Vyp.24: Jakutskaja ASSR, kn.1 Ser.3. Mnogoletnie dannye, ch. 1-6. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 607 s.
17. Anabarskij ulus: Istorija. Kul'tura. Fol'klor / Administracija munic. Obrazovaniya «Anabarskij nacional'nyj (dolgano-jevenkij) ulus»; In-t gumanit. issled. AN RS (Ja); Gl.red. kol. serii V.N. Ivanov (gl. red.) i dr.; Red. kol.: Bojakova S.I. i dr. – Jakutsk: Bichik, 2005. – 232 s.
18. Danilov Ju.G., Fedorov A.N. i dr. Landshafty Jakutii – Jakutsk: Izdat. dom SVFU, 2016 – 100 s.
19. Obshhee merzlotovedenie (geokriologija). – M.: Izd-vo MGU, 1978. – 464 s.
20. Tyrtikov, A.P. Vlijanie rastitel'nogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1969. – 192 s.
21. Zheleznyak, M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona jugo-vostoka Sibirskoj platformy. – Novosibirsk: Nauka, 2005. – 227 s.