

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 551.345; 911.52
DOI: 10.15372/KZ20230601
EDN: AJVUMS

**МЕРЗЛОТНО-ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АНАБАР
НА СТЫКЕ ТУНДРЫ И ПРИТУНДРОВОГО ЛЕСА
ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА**

С.В. Калиничева*, Н.Н. Никифорова, И.Е. Мисайлов, Н.А. Плотников, А.Н. Федоров

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

**Автор для контакта; e-mail: ikoveta@rambler.ru*

Представлены результаты исследований, проведенных на границе тундры и притундрового леса в Анабарском районе Республика Саха (Якутия) с целью изучения динамики мерзлотных ландшафтов и выявления влияния растительного покрова на температурный режим и глубину сезонного протаивания пород. Установлено зарастание Анабарской тундры лесом, рост которого совпадает по времени со вторым периодом длительного потепления Арктики (1979–2011 гг.). Вытеснение тундры лесом подразумевает также изменение мерзлотных условий района. По результатам исследования было установлено, что сезонноталый слой имеет наибольшую мощность на тундровом участке, с увеличением лесистости он уменьшается. Температура пород, напротив, имеет низкие значения в тундре, а в притундровых лесах температура мерзлых пород выше. В работе представлены результаты первого этапа исследования. На рассматриваемой территории планируются дальнейшие мониторинговые исследования.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые породы, мерзлотные ландшафты, тундра, потепление климата, наступление леса на тундру.*

Ссылка для цитирования: Калиничева С.В., Никифорова Н.Н., Мисайлов И.Е., Плотников Н.А., Федоров А.Н. Мерзлотно-ландшафтные условия в бассейне реки Анабар на стыке тундры и притундрового леса при современном потеплении климата // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 6, с. 3–11. DOI: 10.15372/KZ20230601. EDN: AJVUMS.

**PERMAFROST-LANDSCAPE CONDITIONS IN THE ANABAR RIVER BASIN
AT THE TUNDRA–WOODLAND INTERFACE UNDER CONDITIONS
OF MODERN CLIMATE WARMING**

S.V. Kalinicheva*, N.N. Nikiforova, I.E. Misaylov, N.A. Plotnikov, A.N. Fedorov

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia*

**Corresponding author; e-mail: ikoveta@rambler.ru*

The results of studies carried out at the tundra–woodland interface in the Anabar region of the Republic of Sakha (Yakutia) in order to trace the dynamics of permafrost landscapes and identify the influence of vegetation on the soil temperature regime and seasonal thawing depth are presented. The overgrowing of tundra with larch trees took place during the second period of long-term warming in the Arctic (1979–2011). The displacement of tundra communities by woodland communities has changed permafrost conditions in the region. Thus, according to our data, the maximum depth of seasonal thawing is reached in the tundra area; the depth of seasonal thawing decreases with an increase in the woodland density. On the contrary, permafrost temperature has minimum values in the tundra area and increases under woodland. In this paper, the results of the first – stage of the study are presented. Further monitoring studies are planned in the area under consideration.

Keywords: *permafrost, permafrost landscapes, tundra, climate change, overgrowing of tundra with trees.*

ВВЕДЕНИЕ

Современное потепление климата со значительными ландшафтными изменениями наиболее ярко выражено в районах Арктики и Субарктики.

По мере потепления климата все дальше на север сдвигается граница лесов – тундра вытесняется лесом [Pearson et al., 2013; Rees et al., 2020; Kreplin

et al., 2021; Limpens *et al.*, 2021; Magnússon *et al.*, 2021], что подразумевает также изменение мерзлотных условий территории. Последнему уделяется пристальное внимание ввиду того, что большая часть тундровых ландшафтов, отличающихся повышенной льдистостью, является наиболее чувствительной к потеплению климата и к техногенному воздействию [Григорьев и др., 2006; Morgenstern *et al.*, 2011; Fedorov *et al.*, 2014; Schuur *et al.*, 2015]. По исследованиям А.Н. Федорова [Fedorov *et al.*, 2014], геокриологическая ситуация в тундровой зоне северо-востока Евразии в 2000-е гг. ухудшилась по сравнению с периодом потепления 1988–1995 гг.

Российская Арктика является недостаточно изученным регионом, в частности, требуются наземные исследования на примерно половине всей циркумарктической площади кустарниковых и кочковато-кустарниковых экосистем с преобладанием тундровых экосистем [Raynolds *et al.*, 2019]. По В. Рису [Rees *et al.*, 2020], из четырех арктических регионов очень мало фактических данных приведено для региона Восточной Сибири Российской Арктики. Однако, если на востоке от р. Лены проводились некоторые исследования, например в районе Индигирской низменности [Magnússon *et al.*, 2021; Heijmans *et al.*, 2022], то западная часть от р. Лены является “белым пятном” во всей циркумполярной области ввиду отсутствия фактических полевых данных о состоянии мерзлотных ландшафтов.

Среди исследований разнообразия, состава и структуры растительности тундры и лесотундры на данной территории известны работы В.Б. Сочавы [1933, 1934], В.Н. Андреева и др. [1980], В.И. Перфильевой и др. [1991], Н.С. Карпова [1980] и М.Ю. Телятникова [2018]. Так, в трудах В.Б. Сочавы, обобщающих результаты экспедиции 1932 г., описываются отдельные лесные островки, доходящие по левому берегу р. Анабар до р. Яков, а также отдельные деревья лиственницы и лиственничные стланики, идущие до р. Средняя. Автором отмечается, что в целом по р. Анабар лес растет только узкой полосой вдоль реки по склонам. В работах В.Н. Андреева с соавт. [1980] и В.И. Перфильевой с соавт. [1991] отмечается рост лиственницы по склонам сопки полосой вдоль реки, а также описываются небольшие участки тундровых редин к северу от с. Саскылах. Более подробно о лесных островках (куртинах) в устье р. Средняя, а также о сплошных массивах редколесий по долине р. Дороха (левый приток р. Анабар) написано Н.С. Карповым [1980]. Более поздней работой на рассматриваемом участке является исследование М.Ю. Телятникова [2018]. Им в окрестностях с. Саскылах и на других участках охарактеризован растительный покров методами эколого-флористической классификации. Однако

исследований наступления леса на север в условиях потепления климата и его влияния на мерзлотное состояние на данной территории пока не проводилось.

В связи с этим возникает необходимость проведения мониторингового изучения на границе тундры и притундрового леса в Анабарском районе, что позволит контролировать развитие природной среды в условиях потепления климата и выявить его влияние на мерзлотные условия.

В цели и задачи работы входило исследование взаимоотношения леса и тундры в районе с. Саскылах (в тундровой зоне) и выявление влияния растительного покрова на температурный режим и глубину сезонного протаивания пород.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка смещения границы леса на север производилась по топографическим картам масштаба 1:100 000 (Лист R-50-133, 134 и S-61-26, 27) по материалам съемок 1950 и 1973 гг. и современным космоснимкам спутника Landsat-8/OLI (каналы 1–9 с разрешением 30 м), картографического сервиса Google.Maps и Esri. Для пространственно-временного анализа при работе с данными Landsat-8 использовалась программа ArcGis10.1.

Фактическими материалами послужили полученные авторами в ходе полевых исследований в сентябре и ноябре 2021 г. данные по мощности сезонноталого слоя (СТС) и температуре пород, измеренной на подошве годовых теплооборотов (7–8 м), а также ландшафтные описания на трех ключевых участках (примерная площадь 20–30 км²) – в тундре и притундровом лесу (на участке молодого и коренного леса).

Измерения мощности СТС проводились в полевых условиях щупом (1.5 м). Высота щупа позволяла во всех точках наблюдения произвести замеры ввиду небольшой мощности СТС в данном районе, не превышающей в большинстве случаев 1 м.

Замеры температуры горных пород в тундре и притундровом лесу в скважинах до глубины 20 м выполнялись термодатчиками, произведенными фирмой KrioLab и в Институте мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН. Глубина годовых теплооборотов в районе с. Саскылах получена по результатам мониторинговых геотермических исследований и составляет 7–8 м. Значения температуры пород по двум скважинам были экстраполированы на схожие по ландшафту участки.

Во время полевых исследований описывались такие компоненты ландшафта, как растительный древесный и напочвенный покровы, а также микрорельеф поверхности. Для описания растительного покрова применялся маршрутный метод.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Территория исследования расположена на границе тундры и притундрового леса в северо-западной части Якутии в Анабарском районе около с. Саскылах (рис. 1).

Климат исследуемого района отличается резко выраженной континентальностью и суровостью. Среднегодовая температура воздуха по гидрометеостанции Саскылах составляет -14.0°C , января -35.1°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 [Научно-прикладной справочник..., 1989].

По данным Всемирной метеорологической организации, средние темпы повышения температуры приземного воздуха в глобальном масштабе за период 1976–2020 гг. составили $0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет [Третий... доклад..., 2022]. При этом средняя температура в Арктике возрастает почти в 2 раза быстрее по сравнению со средней по планете за последние 100 лет [IPCC 2007..., 2011]. Так, В.М. Катцовым и Б.Н. Порфирьевым [2012] до 2011 г. выделяются два периода наиболее сильных потеплений территории Арктики – 1919–1938 и 1979–2011 гг.

Повышение температуры воздуха прямо или косвенно влияет на изменение других климатических параметров. Так, согласно А.Н. Петровой [2023], на рассматриваемой территории по данным метеостанции Саскылах произошло увеличение продолжительности теплого периода за счет более раннего перехода температуры воздуха через 0°C в сторону повышения. Еще более заметно увеличились суммы температур выше $+10^{\circ}\text{C}$ (период активной вегетации растений). На станции Саскылах этот показатель вырос в 1.8 раза.

В физико-географическом отношении участок исследования относится к Анабаро-Оленекской озерно-термокарстовой провинции страны – Средней Сибири [Мерзлотно-ландшафтная карта..., 2018]. Территория представляет собой в северной части однообразную пологохолмистую Оленекско-Анабарскую низменность с малыми абсолютными высотами 50–60 м, местами до 100–150 м, а в южной части – плоскогорье со средними высотами 200–300 м. Большую роль в современном рельефообразовании сыграла эрозионная деятельность, особенно в формировании долин рек. На территории вблизи Анабарского массива характерны моренные образования и эоловые холмы и гряды в местах, не закрепленных растительностью, а вдоль южной окраины – ряд столовых возвышенностей, представляющих собой выходы траппов [Анабарский улус..., 2005]. Некоторые черты ландшафта, в частности полигонально-валиковый рельеф, сформированы мерзлотными процессами – морозобой-

ными растрескиванием и последующим формированием в трещинах ледяных жил.

Ландшафтная структура исследуемых районов представлена типичными кустарничково-лишайниковыми и моховыми тундровыми, кустарничковыми тундровыми и интразональными тундровыми типами ландшафтов, которые приурочены к пяти типам местности: приводораздельно-элювиальному, склоновому делювиально-солифлюкционному, межлассному, средневысотнотеррасовому и низко-террасовому [Мерзлотно-ландшафтная карта..., 2018].

В окрестностях с. Саскылах можно выделить пять типов растительных ассоциаций (рис. 2). Для пойм рек характерны луга, ивняки, редко ольховники. Полигонально-валиковые тундроболотные комплексы, характерные для речных террас, представлены зарослями ольховника, ивы (красивая и сизая) на валиках, пушицы влагалишной и осоки прямостоящей на мочажинах. Коренной лес характеризуется лиственничными редколесьями голубично-багульниково-брусничными с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом. Редкостойные лиственничные леса голубично-багульничково-брусничные с травяно-зеленомошно-ли-



Рис. 1. Местоположение района исследований.

1 – реки; 2 – озера; 3 – населенные пункты; 4 – границы районов; 5 – район исследования.

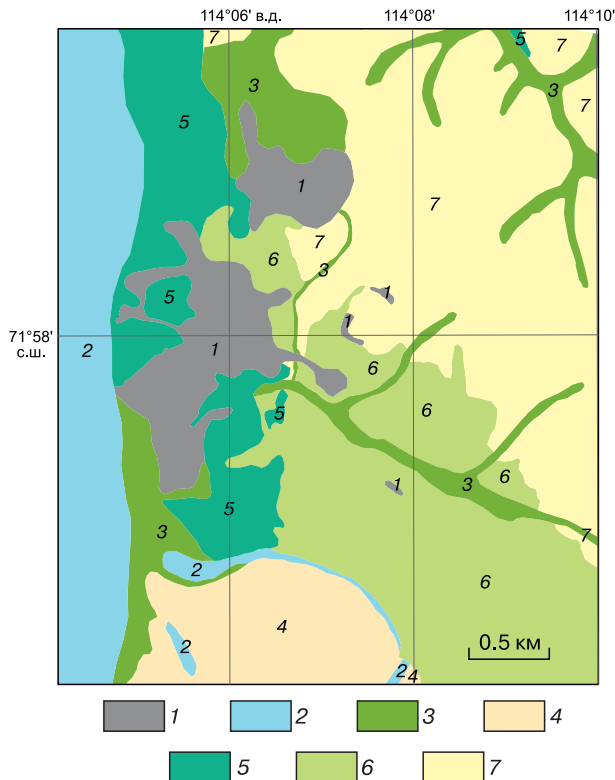


Рис. 2. Карта растительных ассоциаций Анабарского района РС (Я) (в районе с. Саскылах).

1 – селитебные зоны; 2 – водные объекты; 3 – пойменная растительность (луга, ивняки, ольховники); 4 – полигонально-валиковые тундроболота (с зарослями ольховника, ивы, пушицы влагалищной и осок на валиках); 5 – лиственничные редколесья голубично-багульниково-брусничные с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом (коренной лес); 6 – молодые редкостойные лиственничные леса голубично-багульниково-брусничные с травяно-зеленомошно-лишайниковым покровом; 7 – тундра кустарничково-травяно-мохово-лишайниковая.

шайниковым покровом составляют преимущественно молодой лес. Тундровый ландшафт представлен кустарничково-травяно-мохово-лишайниковым покровом.

Многолетнемерзлые грунты распространены на всей рассматриваемой территории. Мощность криолитозоны около с. Саскылах достигает 1000–1500 м. Для района исследования характерны такие мерзлотные процессы, как солифлюкция, морозная сортировка, термокарст, пучение и термоэрозия. Мерзлотные процессы, в частности морозобойное растрескивание пород, определяют важнейшие черты ландшафтов – формирование полигонально-валикового рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С применением топографических карт 1950 и 1973 гг., а также современных космических сним-

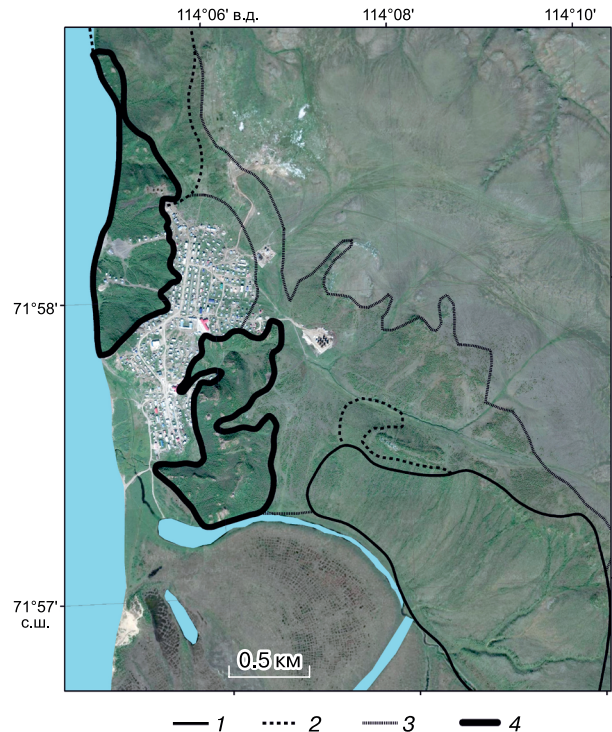


Рис. 3. Изменение границы притундровых лесов в районе с. Саскылах.

1 – 1950 г., 2 – 1973 г., 3 – настоящее время; 4 – коренной лес.

ков спутника Landsat-8/OLI, сервиса Google.Maps и Esri авторами были выявлены ареалы зарастания тундры лесом (рис. 3).

Динамика границы притундровых лесов на рис. 3 отображена линиями: 1 – граница молодого леса по съемке 1950 г.; 2 – по съемке 1973 г.; 3 – современная территория притундровых лесов; 4 – коренной лес. Рост современного молодого леса отмечается с 1980–1990 гг., что совпадает по времени со вторым периодом длительного потепления Арктики – 1979–2011 гг. (рис. 4) [Катцов, Порфирьев, 2012].

Растительный покров играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, участвуя в поглощении радиации и встречном излучении, изменении затрат тепла на испарение и пр. [Общее мерзлотоведение..., 1978]. Изменения растительного покрова вызывают соответствующие изменения теплообмена между почвой и атмосферой, которые отражаются на промерзании и протаивании пород.

Взаимосвязь растительного покрова и температурного режима грунтов. В исследуемом районе по проведенным измерениям температура пород имеет низкие значения в тундре, а в притундровых лесах она повышается. Так, по полученным в ходе полевых работ данным, в зоне тундры температура пород на подошве годовых теплооборо-

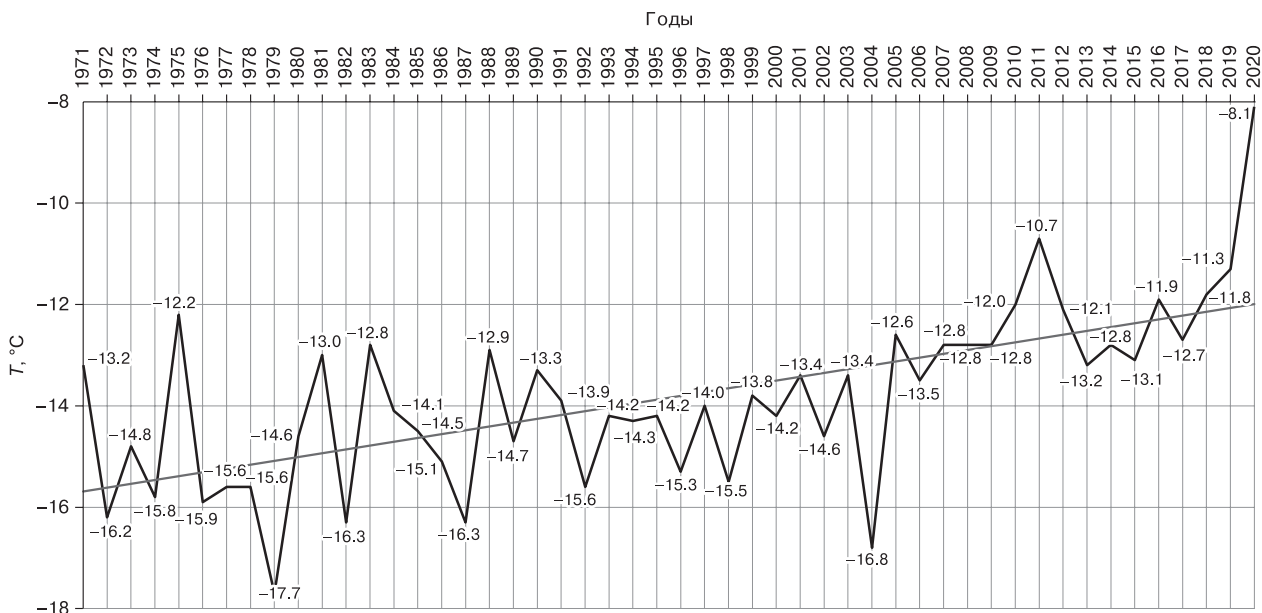


Рис. 4. Изменение среднегодовой температуры воздуха по метеостанции Саскылах (1971–2020 гг.) и тренд повышения среднегодовой температуры воздуха [Погода и климат, 2022].

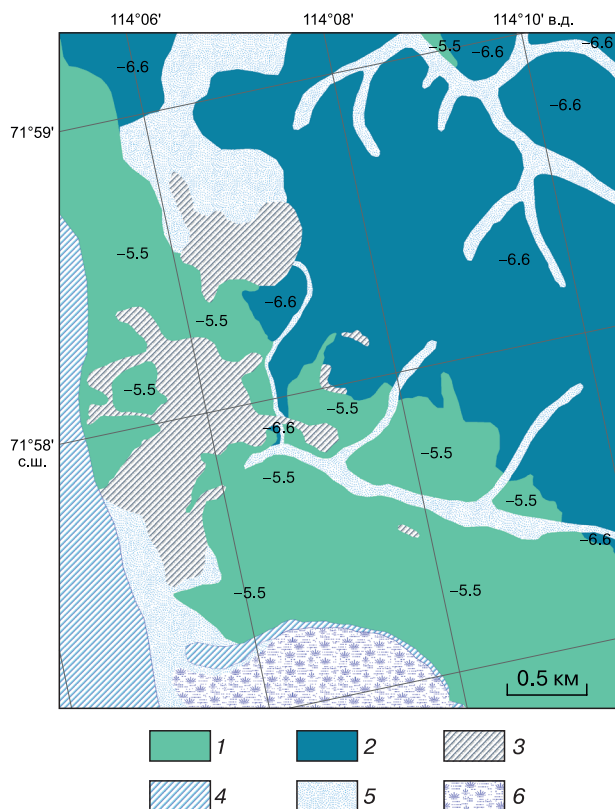


Рис. 5. Среднегодовая температура пород в районе тундры и притундрового леса.

1 – притундровый лес, $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – тундра, $-6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. 3 – сели-тебные зоны; 4 – водные объекты; 5 – долина, пойма рек; 6 – тундроболота.

тов составила $-6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в притундровом лесу $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5, см. таблицу). Это объясняется тем, что на лесных участках высота снежного покрова больше, чем на тундровых открытых участках. За счет увеличения высоты снежного покрова на участке с лесом среднегодовая температура пород, как правило, выше, чем на безлесных открытых территориях, поскольку снег, обладая высокими теплоизоляционными свойствами, повышает среднюю годовую температуру пород. В целом отепляющий эффект снежного покрова усиливается с ростом его мощности и уменьшением плотности. Значительная плотность и большая отражательная способность снега в тундре способствуют сильному промерзанию и накоплению большого запаса холода в породах в течение долгой зимы, и, как следствие, 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.

Данные по мощности СТС и температуре пород

Ландшафт	Мощность СТС, м			Температура пород, $^{\circ}\text{C}$
	мин.	сред.	макс.	
Тундра	0.30	0.87	1.43	-6.6
Притундровый лес				
молодой	0.60	0.75	0.90	-5.5
коренной	0.48	0.70	0.91	-5.5

Взаимосвязь растительного покрова и мощности сезонноталого слоя. В районе тундры были проведены измерения мощности СТС в девяти точках. Максимальное значение (1.43 м) зафиксировано на участке тундры с кустарничково-лишайниковым покровом, минимальное (0.3 м) – на участке с бруснично-багульниковым покровом. В притундровом молодом лесу измерения мощности СТС были проведены в шести точках. Максимальное значение мощности СТС (0.9 м) здесь зафиксировано на верхней части склона ближе к водоразделу, а минимальное (0.6 м) – в нижней части склона. В притундровом коренном лесу замеры мощности СТС проводились в четырех точках на водораздельной поверхности. Максимальное значение мощности СТС в коренном лесу (по измерениям авторов) составило 0.91 м, а минимальное – 0.48 м. Разница в мощности СТС здесь, вероятно, обусловлена разной сомкнутостью крон лиственничников, что непосредственно влияет на количество прямой солнечной радиации, поступающей на поверхность Земли, и тем самым на глубину сезонного протаивания. В целом по территории исследования, исходя из приведенных

данных, прослеживается закономерность уменьшения мощности сезонноталого слоя с увеличением лесистости (см. рис. 6). Данный факт, согласно А.П. Тыртыкову [1969], обусловлен тем, что под крупными деревьями почва протаивает медленнее, чем на прогалинах. Под лесной растительностью в криолитозоне глубина протаивания пород в среднем 2 раза меньше, чем на участках, где нет растительного покрова. Подобная закономерность на п-ове Таймыр также была получена Н.В. Ловелиусом [1975, 1978].

ДИСКУССИЯ

О НАСТУПЛЕНИИ ЛЕСА НА СЕВЕР

Разные периоды потепления Арктики [Катцов, Порфирьев, 2012; Fedorov et al., 2014], а также изменение других климатических параметров, таких как увеличение продолжительности теплого периода и суммы температур выше $+10^{\circ}\text{C}$ (период активной вегетации растений) [Петрова, 2023], не могли не сказаться на ландшафтном облике территории и, соответственно, на мерзлотных условиях. В частности, повышение температуры воздуха и увеличение теплообеспеченности вегетационного периода создает условия для смены типов растительности, что находит подтверждение в настоящей работе.

Исходя из сведений по растительному покрову, приведенных в вышеуказанных работах [Сочева, 1933, 1934; Андреев и др., 1980; Карпов, 1980; Перфильева и др., 1991; Телятников, 2018], о более северных островках леса в долине р. Средняя и густых лиственничных редицах в долине р. Дороха может возникать дилемма: правильно ли говорить о наступлении леса на север около с. Саскылах, если севернее лес уже имеет место быть? Действительно, такой момент может сбивать с толку. Однако давно установлено, что отдельные деревья в стланиковой и полустланиковой форме встречаются намного севернее [Тюлина, 1937; Крючков, 1976], причем древесная растительность проникает в безлесную тундру длинными языками вдоль речных долин как крупных рек, так и мелких речек [Шренк, 1855; Миддендорф, 1867; Танфильев, 1911]. Объясняется это в основном согревающей ролью рек и рядом других локально отепляющих факторов [Миддендорф, 1867; Нордениельд, 1885; Шостакович, 1911]. Продвижение же леса на север, по мнению авторов, должно характеризоваться более или менее равномерным распределением лиственницы по всем элементам рельефа (кроме болот), следовательно, при положительном сдвиге лиственницы в сторону тундры она будет расти повсеместно в разнообразных условиях, а не только в наилучших, что и наблюдается на исследуемой территории.

Другой вопрос касается скорости роста лиственницы в рассматриваемом районе. Деревья в

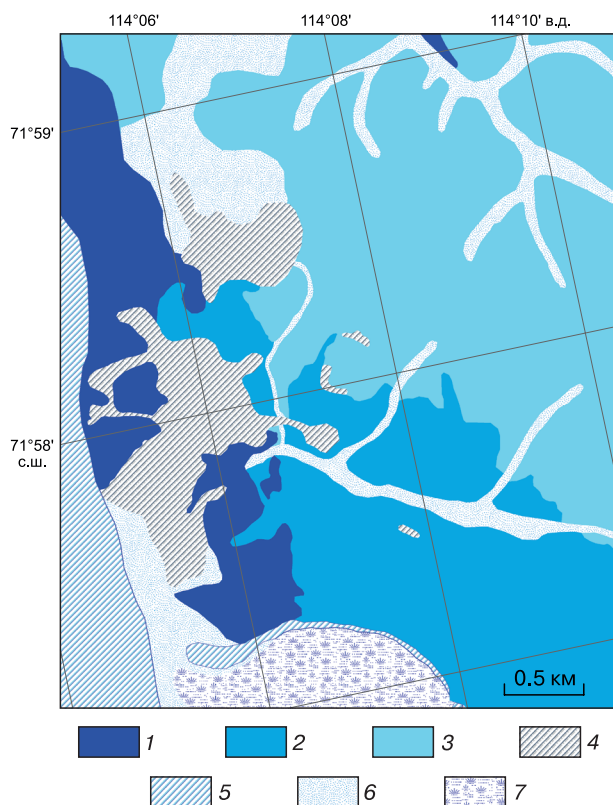


Рис. 6. Мощность сезонноталого слоя в районе тундры, молодого и коренного леса.

1 – 0.70 м (тундра), 2 – 0.75 м (молодой лес), 3 – 0.87 м (коренной лес). 4 – селитебные зоны; 5 – водные объекты; 6 – долина, пойма рек; 7 – тундроболота.

молодом лесу характеризуются в среднем высотой 5 м. Это означает, что скорость роста деревьев составляет 12.5 см/год, если брать период с 1980 по 2020 г. Однако анализ Н.С. Карпова [1980] вызывает вопрос. Им ранее был сделан анализ прироста по четырем спилам стволов лиственницы преимущественно стланиковой формы в районе р. Средняя. Полученные данные показывают, что годовой прирост деревьев на этом участке составляет примерно 0.6 мм при глубине сезонного оттаивания 0.2–0.3 м. Между тем полученные нами данные говорят о достаточно большой скорости прироста лиственничников в 30 км южнее рассматриваемого Н.С. Карповым участка и при максимальной глубине оттаивания 0.9–1.4 м. Вероятно, на существенное увеличение скорости прироста деревьев, помимо повышения глубины протаивания, повлиял ряд климатических факторов, указанных выше. Но однозначно, такая разница в скорости прироста еще долгое время будет вызывать вопросы. Тем не менее в пользу полученных нами данных Н.С. Карповым отмечается, что тенденция увеличения прироста достигла своего максимума в 1970–1975 гг., что совпадает со временем роста рассматриваемого нами молодого леса.

Несмотря на отсутствие репрезентативных спутниковых снимков на начальный период роста молодого леса, проведенные исследования в районе бассейна р. Анабар на стыке тундры и притундрового леса около с. Саскылах с применением топографических карт, составленных по материалам съемок 1950 и 1973 гг. в масштабе 1:100 000, и современных спутниковых данных, показывают пространственно-временное наступление леса на тундру, а также отражают тенденцию изменения мерзлотно-ландшафтных условий в ближайшем будущем в условиях потепления климата.

Таким образом, мерзлотно-ландшафтная обстановка тундровой зоны северо-запада Восточной Сибири претерпела существенные изменения с 1980-х гг. по настоящий момент. Но остаются вопросы, которые требуют дальнейшего анализа. Для этих целей необходимо проводить обстоятельные мониторинговые исследования на территории Арктики в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование в Анабарском районе на границе тундры и притундрового леса с применением полевых данных, материалов космической съемки и картографических материалов позволило выделить ареалы наступления леса на тундру в условиях меняющегося климата, а также выявить влияние растительного покрова на температуру пород и мощность сезонноталого слоя. Так, по результатам исследования было установлено, что СТС имеет наибольшую мощность на тундровом участке, с увеличением лесистости она умень-

шается. Температура пород, напротив, имеет низкие значения в тундре, а в притундровых лесах температура мерзлых пород выше. Последний параметр, в отличие от мощности СТС, был получен лишь в двух ландшафтах – тундре и притундровом лесу. С увеличением лесистости температура пород повышается: если в коренном лесу температура пород составляет -5.5°C , то в молодом лесу, где более разреженный древостой по сравнению с коренным лесом, температура пород варьирует от -6.6 до -5.5°C .

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

Работа выполнена в рамках базового проекта СО РАН № АААА-А20-120111690009-6.

Литература

- Анабарский улус:** История. Культура. Фольклор / Под ред. В.Н. Иванова. Якутск, Бичик, 2005, 232 с.
- Андреев В.Н., Перфильева В.И., Нахабцева С.Ф.** Флора окрестностей поселка Саскылах на реке Анабар (Северо-Западная Якутия) // Ботан. журн., 1980, т. 65, № 11, с. 1560–1568.
- Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.В.** Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 74–94.
- Карпов Н.С.** О приросте лиственницы Гмелина в Анабарской тундре // Бюл. НТИ. Биологические проблемы Севера. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1980, дек., с. 12–14.
- Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.** Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика, 2012, № 2 (6), с. 66–79.
- Крючков В.В.** Чуткая Субарктика. М., Наука, 1976, 138 с.
- Ловелиус Н.В.** Оценка динамики сезонного прироста лиственницы даурской в лесном массиве Ары-Мас (Таймыр, $72^{\circ}30'$ с.ш.) // Ботан. журн., 1975, т. 60, № 10, с. 1476–1479.
- Ловелиус Н.В.** Снежный покров и мерзлота // Ары-Мас: Природные условия, флора и растительность самого северного в мире лесного массива. Л., Наука, 1978, с. 21–30.
- Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия).** Масштаб 1:1 500 000 / АН. Федоров, Я.И. Торговкин, А.А. Шестакова и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2018, 2 л.
- Миддендорф А.Ф.** Путешествие на север и восток Сибири. СПб., Тип. Академии наук, 1867, 992 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР.** Вып. 24: Якутская АССР, кн. 1, сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Л., Гидрометеоздат, 1989, 607 с.
- Норденшельд А.Е.** В стране льдов и холода: Путешествие бар. А.Е. Норденшельда по Северному Ледовитому океану в 1877–78 гг. СПб., Тип. С. Добродеева, 1885, 92 с.
- Общее мерзлотоведение (геокриология)** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.
- Перфильева В.И., Тетерина Л.В., Карпов Н.С.** Растительный покров тундровой зоны Якутии. Якутск, Якут. науч. центр СО АН СССР, 1991, 192 с.

Петрова А.Н. Изменение некоторых метеорологических характеристик теплого периода в западных районах Республики Саха (Якутия) // *Материалы докл. Всерос. конф. с междунар. участием “Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата”* (Якутск, 22–23 марта 2023 г.). Якутск, 2023, с. 218–220.

Погода и климат [Электрон. ресурс]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 30.05.2022).

Сочава В.Б. Тундры бассейна реки Анабары // *Изв. Гос. Геогр. о-ва*, 1933, т. 6, вып. 4, с. 340–364.

Сочава В.Б. Растительные ассоциации Анабарской тундры // *Ботан. журн. СССР*, 1934, т. 19, вып. 3, с. 264–304.

Танфильев Г.И. Пределы лесов в полярной России по исследованиям в тундре Тиманских самоедов. Одесса, Тип. Е.И. Фесенко, 1911, 286 с.

Телятников М.Ю. Зональная тундра и лесотундра среднего течения реки Анабар (подзона южных тундр, Северо-Западная Якутия) // *Вестн. БГУ. Биология, география*, 2018, № 4, с. 5–19.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб., Научное издание, 2022, 124 с.

Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1969, 192 с.

Тюлина Л.Н. Лесная растительность Хатангского района у ее северного предела // *Тр. Арктического ин-та*, 1937, т. 63, с. 83–180.

Шостакович В.Б. Температура рек Сибири и количество переносимого ими в Северный Ледовитый океан тепла // *Записки по гидрографии*, 1911, т. 33, с. 123.

Шренк А.И. Путешествие по северо-востоку Европейской России через тундры самоедов к северным Уральским горам. СПб., Тип. Григория Трусова, 1855, 670 с.

Fedorov A.N., Ivanova R.N., Park H. et al. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia // *Polar Sci.*, 2014, vol. 8, iss. 2, p. 114–128. – <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.02.001>

Heijmans M.M. P.D., Magnússon R., Lara M.J. et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // *Nat. Rev. Earth and Environ.*, 2022, vol. 3 (1), p. 68–84. – <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>

IPCC 2007: Fourth assessment report, Climate Change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties, goods and services. – www.ipcc.ch (last visited: 07.02.2011).

Kreplin H.N., Santos Ferreira C.S., Destouni G. et al. Arctic wetland system dynamics under climate warming. *Wiley Interdisciplinary Reviews // Water*, 2021, vol. 8 (4), e1526. – <https://doi.org/10.1002/WAT2.1526>

Limpens J., Fijen T.P.M., Keizer I. et al. Shrubs and degraded permafrost pave the way for tree establishment in subarctic peatlands // *Ecosystems*, 2021, vol. 24, p. 370–383. DOI: 10.1007/s10021-020-00523-6.

Magnússon R., Limpens J., Kleijn D. et al. Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra // *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 782, p. 1–16.

Morgenstern A., Grosse G., Gunther F. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, p. 849–867.

Pearson R.G., Phillips S.J., Loranty M.M. et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change // *Nat. Clim. Chang.*, 2013, vol. 3, p. 673–677.

Raynolds M.K., Walker D.A., Balsler A. et al. A raster version of the Circumpolar Arctic Vegetation Map (CAVM) // *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 232, p. 111297.

Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S. et al. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? // *Glob. Change Biol.*, 2020, vol. 7 (26), p. 3965–3977.

Schuur E.A., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*, 2015, vol. 520, p. 171.

References

Anabarskii ulus: Istoriya. Kul'tura. Folklor [Anabarsky district: History. Culture. Folklore]. V.N. Ivanova (ed.). Yakutsk, Bichik, 2005, 232 p. (in Russian).

Andreev V.N., Perfil'eva V.I., Nakhabtseva S.F. Flora of the environs of the village of Saskylakh on the Anabar River (North-western Yakutia). *Botanicheskii Zhurnal [Bot. Journal]*, 1980, vol. 65, No. 11, p. 1560–1568 (in Russian).

Grigoriev M.N., Razumov S.O., Kunitskiy V.V., Spector V.B. Dynamics of the Russian East Arctic Sea coast: major factors, regularities and tendencies. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2006, vol. X, No. 4, p. 74–94 (in Russian).

Karpov N.S. Gmelin larch growth in the Anabar tundra. *Bulletin NTI [Byull. NTI. Biological problems of the North]*. Yakutsk, 1980, p. 12–14 (in Russian).

Kattsov V.M., Porfiriev B.N. Climate change in the Arctic: consequences for the environment and the economy. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economics]*, 2012, No. 2 (6), p. 66–79 (in Russian).

Kryuchkov V.V. Chutkaya Chukotka [Sensitive Subarctic]. Moscow, Nauka, 1976, 138 p. (in Russian).

Lovelius N.V. Evaluation of the seasonal growth dynamics of Dahurian larch in the Ary-Mas forest (Taimyr, 72°30' N.S.). *Botanicheskii Zhurnal [Bot. Journal]*, 1975, vol. 60, No. 10, p. 1476–1479 (in Russian).

Lovelius N.V. Snow cover and permafrost. In: *Ary-Mas: Natural conditions, flora and vegetation of the northernmost forest in the world*. Leningrad, Nauka, 1978, p. 21–30 (in Russian).

Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1:1,500,000 / A.N. Fedorov, Ya.I. Torgovkin, A.A. Shestakova et al.; ch. ed. M.N. Zheleznyak. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2018, 2 p. (in Russian).

Middendorf A.F. Puteshestvie na sever i vostok Sibiri [Journey to the North and East of Siberia]. St. Petersburg, 1867, 992 p. (in Russian).

Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Issue 24: Yakut ASSR, book 1, series 3. Long-term data, parts 1–6. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 607 p. (in Russian).

Nordenskiöld A.E. V strane l'dov i kholoda [In the land of ice and cold: Journey bar. A.E. Nordenskiöld on the Arctic Ocean in 1877–78]. St. Petersburg, Type. S. Dobrodeeva, 1885, 92 p. (in Russian).

Obshee merzlotovedenie (geokriologiya) [General permafrost (geocryology)]. V.A. Kudryavtsev (ed.). Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1978, 464 p. (in Russian).

Perfil'eva V.I., Teterina L.V., Karpov N.S. Rastitelnyi pokrov tundrovoi zony Yakutii [Vegetation cover of the tundra zone of Yakutia]. Yakutsk, Yakut Scientific Center, SO AN SSSR, 1991, 192 p. (in Russian).

Petrova A.N. Changes in some meteorological characteristics of the warm period in the western regions of the Republic of Sakha (Yakutia). In: *Materials of reports of the All-Russian conference*

- with international participation “Stability of natural and technical systems of the permafrost zone in conditions of climate change” (Yakutsk, March 22–23, 2023). Yakutsk, 2023, p. 218–220 (in Russian).
- Weather and climate [Electronic resource]. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (last visited: 30.05.2022).
- Sochava V.B. Tundra of the Anabara river basin. *Izv. Gos. Geograf. o-va [Izv. State. Geogr. Society]*, 1933, vol. 6, iss. 4, p. 340–364.
- Sochava V.B. Plant associations of the Anabar tundra. *Botanicheskii Zhurnal SSSR [Bot. Journal the USSR]*, 1934, vol. 19, iss. 3, p. 264–304.
- Tanfilyev G.I. Predely lesov v polyarnoi Rossii po issledovaniyam v tundra Timanskikh samoedov [Forest limits in polar Russia according to research in the tundra of the Timan Samoeds]. Odessa, Type. E.I. Fesenko, 1911, 286 p. (in Russian).
- Telyatnikov M.Yu. Zonal tundra and forest-tundra of the middle reaches of the Anabar River (subzone of the southern tundra, northwestern Yakutia). *Bull. BGU [Bulletin of BGU. Biology, geography]*, 2018, No. 4, p. 5–19.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. St. Petersburg, Naukoemkie tehnologii, 2022, 124 p. (in Russian).
- Tyrtikov A.P. Vliyaniye rastitelnogo pokrova na promerzaniye i protaivaniye gruntov [Influence of vegetation cover on freezing and thawing of soils]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1969, 192 p. (in Russian).
- Tyulina L.N. Forest vegetation of the Khatanga region at its northern limit. *Trudy Arkt. in-ta [Proc. Arctic Institute]*, 1937, vol. 63, p. 83–180 (in Russian).
- Shostakovich V.B. Temperature of the rivers of Siberia and the amount of heat transferred by them to the Arctic Ocean. *Zapisi po gidrografii [Records on hydrography]*, 1911, vol. 33, p. 123 (in Russian).
- Shrenk A.I. Journey through the North-East of European Russia through the Samoyed tundra to the northern Ural Mountains. St. Petersburg, Type. Grigory Trusov, 1855, 670 p. (in Russian).
- Fedorov A.N., Ivanova R.N., Park H., Hiyama T., Iijima Y. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia. *Polar Sci.*, 2014, vol. 8, iss. 2, p. 114–128. – <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.02.001>
- Heijmans M.M. P.D., Magnússon R., Lara M.J. et al. Tundra vegetation change and impacts on permafrost. *Nat. Rev. Earth and Environ.*, 2022, vol. 3 (1), p. 68–84. – <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>
- IPCC 2007: Fourth assessment report, Climate Change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties, goods and services. – www.ipcc.ch (last visited: 07.02.2011).
- Kreplin H.N., Santos Ferreira C.S., Destouni G., Keesstra S.D., Salvati L., Kalantari Z. Arctic wetland system dynamics under climate warming. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Water*, 2021, vol. 8 (4), e1526. – <https://doi.org/10.1002/WAT2.1526>
- Limpens J., Fijen T.P.M., Keizer I., Meijer J., Olsthoorn F., Pereira A., Postma R., Suyker M., Vasander H., Holmgren M. Shrubs and degraded permafrost pave the way for tree establishment in subarctic peatlands. *Ecosystems*, 2021, vol. 24, p. 370–383. DOI: 10.1007/s10021-020-00523-6.
- Magnússon R., Limpens J., Kleijn D. et al. Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 782, p. 1–16.
- Morgenstern A., Grosse G., Gunther F. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. *The Cryosphere*, 2011, vol. 5, p. 849–867.
- Pearson R.G., Phillips S.J., Lorant M.M. et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 2013, vol. 3, p. 673–677.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Balsler A. et al. A raster version of the Circumpolar Arctic Vegetation Map (CAVM). *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 232, p. 111297.
- Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S. et al. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? *Global Change Biol.*, 2020, vol. 7 (26), p. 3965–3977.
- Schuur E.A., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, vol. 520, p. 171.

*Поступила в редакцию 24 июня 2022 г.,
после доработки – 8 октября 2023 г.,
принята к публикации 10 ноября 2023 г.*