

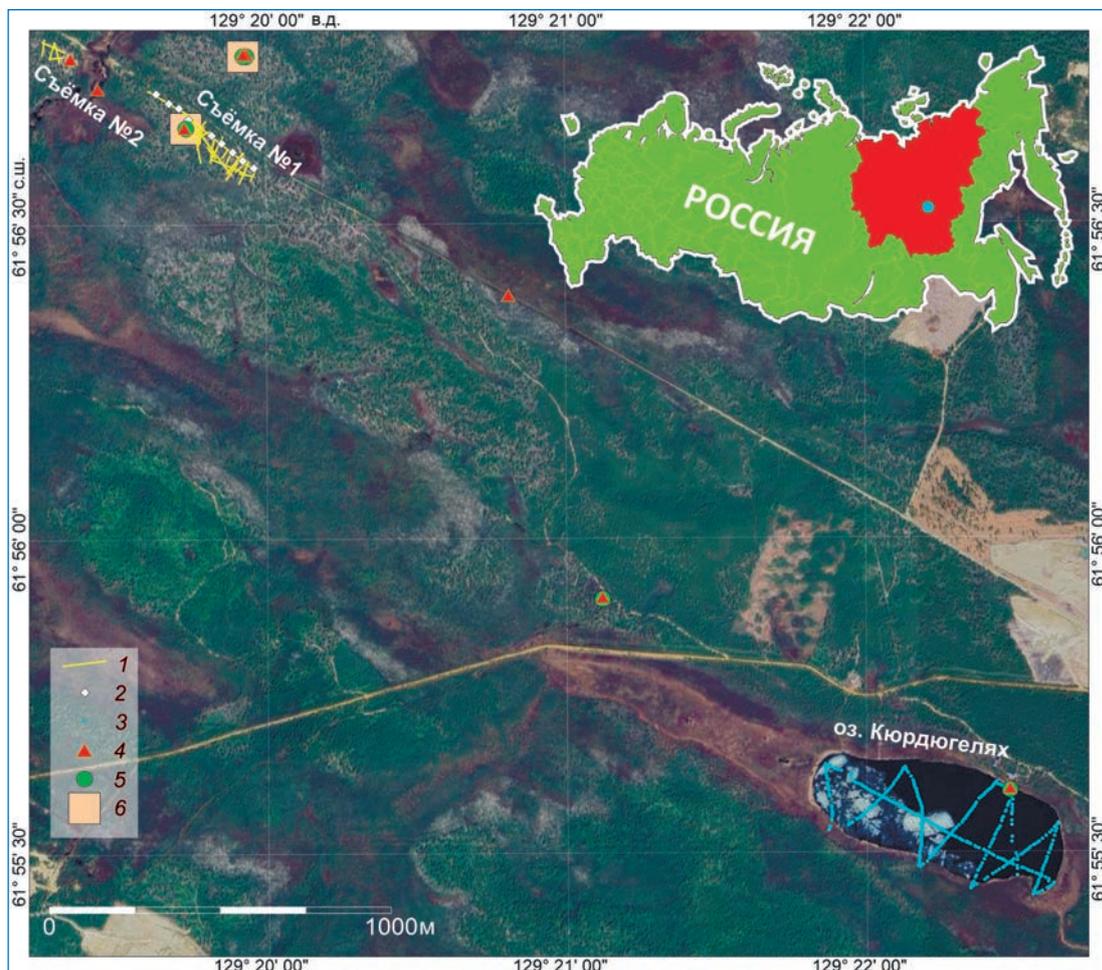
## ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУБАЭРАЛЬНЫХ И СУБАКВАЛЬНЫХ ТАЛИКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

В ходе трех осенне-летних полевых сезонов 2022–2024 годов на экспериментальном полигоне «Левая Шестаковка» Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, расположенном в бассейне одноименной реки (Республики Саха (Якутия)) выполнялись комплексные научные работы, направленные на изучение процессов теплопереноса в многолетнемерзлых породах и таликах. Основу исследований составили гидрологические (батиметрическая съемка), геофизические (георадарное профилирование и электроразведка), термометрические (измерение температур пород, воздуха и воды) и актинометрические измерения. Отдельной задачей являлось изучение влияния пожаров на развитие многолетней мерзлоты. Схема расположения работ представлена на рис. 1. Конечная цель исследований заключалась в создании математической модели теплопереноса, позволяющей прогнозировать состояние многолетнемерзлых пород и таликов при различных условиях. При этом все собранные полевые материалы использовались в параметризации математической модели во время моделирования указанных процессов в Центральной Якутии.

Участок «Левая Шестаковка» площадью около 1 км<sup>2</sup> расположен в бассейне реки Шестаковки (левый приток реки Лены) на пологом склоне денудационной равнины и характеризуется абсолютными высотами около 200 м. Климат района резко континентальный. Среднегодовая температура окружающего воздуха за весь период метеорологических наблюдений (1830–2023) составляет  $-10,0$  °С. Средняя многолетняя температура января  $-41,1$  °С, а июля  $+18,3$  °С. Среднегодовое количество осадков с 1937 по 2023 год оценивается в 265 мм/год. Верхнюю часть геологического разреза до глубины 30 м составляют рыхлые песчаные отложения с редкими прослоями глин. На территории Сибирской платформы, где и располагается район исследования, величины геотермического потока варьируются в пределах от 13 до 63 мВт/м<sup>2</sup>. В г. Якутске она составляет 42 мВт/м<sup>2</sup>. Центральная Якутия относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Температура горных пород на глубине 100 м составляет  $-1,6...-0,6$  °С. В зависимости от ландшафта варьирует от положительных (близких к 0 °С) значений до  $-3...-2$  °С и ниже. Мощность сезонно-талого слоя изменяется от 4 м на пологих

Рис. 1. Схема расположения работ:

- 1 — георадарные маршруты (2023 год);
- 2 — пункты ВЭЗ (2023 год);
- 3 — пункты замеров глубин (2024 год);
- 4 — пункты пиранометрических измерений (2023–2024 годы);
- 5 — пункты термометрических измерений (2023–2024 годы);
- 6 — пункты измерения профиля влажности грунта (2024 год) и экспериментов по имитации лесных пожаров (2022 год, 2024 год)



склонах и водоразделах, покрытых сосновым лесом, до 0,5 м на марях. Основной интерес для исследования представляют таликовые зоны, повсеместно развитые в этом районе. Оценка распространения субаэральнх и субаквальных таликов важна как в связи с тем, что они оказывают существенное влияние на характер стока малых рек, так и для уточнения инженерно-геокриологических условий региона в ходе его техногенного освоения. Наиболее распространенные в крупном и густонаселенном регионе Центральной Якутии гидрогенные талики являются перспективными источниками воды.

Геофизические исследования выполнялись с целью сбора данных для верификации результатов последующего математического моделирования формирования и развития субаэральнх таликов. Георадарные работы проводились на обоих берегах реки Шестаковки (рис. 1) прибором ОКО-2 (ООО «ЛогиС», Россия) с раздвижными антеннами АБ-150 (частота зондирующих импульсов 150 МГц) по стандартной методике. Полученные данные показывают практически повсеместное развитие талика на всех участках работ (рис. 1). Глубина залегания сезонно-мерзлого слоя на правом берегу реки (съёмка № 1, рис. 1) в среднем составляет около 2,3 м и меняется в пределах от 1,8 до 3,7 м. Значительное его заглубление наблюдается в центральной и южной частях съёмки, где преобладают открытые участки местности. Кровля талика маркируется подошвой сезонно-мерзлого слоя, который располагается в интервале глубин от 2 до 14 м при среднем значении 6,1 м. Глубина залегания сезонно-мерзлого слоя на левом берегу реки (съёмка № 2, рис. 1) в среднем варьирует в пределах от 2 до 4 м. Заглубление слоя наблюдается в восточной части, приуроченной к склону. Подошва талика располагается в интервале глубин от 3 м до 7,1 м при среднем значении 4,2 м.

При выполнении электроразведочных работ методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) применялись электроразведочный генератор тока SGD-EGC200 «SKAT IV» СГФП 420.00.00 и электроразведочный измеритель SGD-ЕЕМ «MEDUSA-B2» СГФП 221.00.00-02 Версия V2.18 (НПК «СибГеофизПрибор», Россия). Измерения выполнялись на правом берегу реки (рис. 1) с использованием четырехэлектродной симметричной установки Шлюмберже. Полученные данные указывают на то, что изучаемый участок можно условно подразделить на четыре слоя. Верхний, сильно дифференцированный по электрическим свойствам, ассоциируется с сезонно-мерзлым. Для него характерны удельные сопротивления в интервале от 590 до 4460 Ом·м, а его мощность составляет около 2 м. Ниже располагается

слой низкоомных пород с удельным сопротивлением 100–270 Ом·м, что свойственно водоносному талику. Он контрастно выделяется на протяжении всего профиля. Мощность этого слоя составляет 3,0–5,5 м. Третий слой мощностью 4–6 м обладает высоким удельным сопротивлением до 2050 Ом·м, что характерно для многолетнемерзлых пород. Удельное сопротивление самого нижнего слоя составляет 220 Ом·м. Он ассоциируется либо с изменением литологического состава, либо с наличием грунтовых вод. Геоэлектрический разрез, совмещенный с георадарным, представлен на рис. 2.

Исследование субаквальных таликов выполнялось на примере талика, находящегося под озером Кюрдюгелях (рис. 1). Водоем расположен в 25 км по Покровскому тракту от г. Якутска и по происхождению является тукулановым (котловина выдувания). На озере Кюрдюгелях были проведены батиметрические, термометрические (воды и воздуха) и актинометрические измерения с целью сбора данных для последующего моделирования формирования и развития субаквального талика. По результатам промеров глубин было установлено, что средняя глубина озера составляет 1,2 м, а максимальная достигает 1,7 м. Рельеф дна пологий, без свалов глубин. Площадь водоема оценена в 190 тыс. м<sup>2</sup> при объеме водной массы около 228 тыс. м<sup>3</sup>. Альbedo водной поверхности варьирует в пределах от 0,07 до 0,12 в зависимости от облачности, прозрачности атмосферы, высоты Солнца и характера волнения, что учитывается при моделировании. Средняя температура воздуха во время наблюдений составляла около 8,4, а воды 9,3 °С.

Для получения значений альbedo от прочих различных поверхностей в работах 2023 года применялся пиранометр ПЕЛЕНГ СФ-06-21 (ОАО «Пеленг», Республика Беларусь), а в наблюдениях 2024 года использовалась пара пиранометров НОВО S-LIB-M003 (Massachusetts, USA). Средние значения альbedo, полученные над слоями мха, лесной подстилки, кустарничковой растительности и песчаных отложений, составляют 0,26, 0,21, 0,25 и 0,28. Их положение показано на рис. 1.

Термометрические измерения также осуществлялись для последующей верификации математической модели. Для этого применялись термодатчики IBS-TH1 (Inkbird Inc., Китай). Положение пунктов измерений показано на рис. 1. Полученные данные указывают на то, что вариации суточного хода температуры окружающего воздуха не проникают в грунт глубже примерно полуметра. При этом, если его поверхность имеет напочвенный покров (мох, разнотравье или лесную подстилку), глубина проникновения суточных температурных вариаций заметно сокращается.

Рис. 2. Результаты измерений методом ВЭЗ, совмещенные с георадарным разрезом

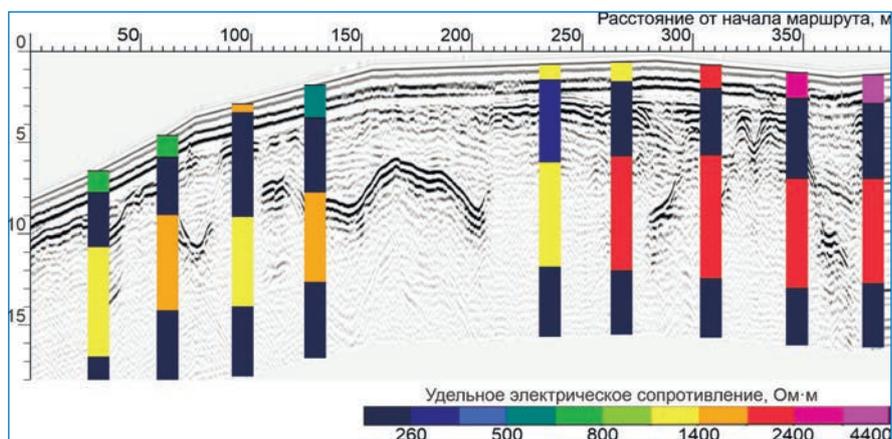




Рис. 3. Эксперимент по имитации лесного пожара 13.09.2022 (а), 30.08.2024 (б) и 03.09.2024 (в)

Для выяснения степени влияния пожаров на многолетнемерзлые породы было проведено в общей сложности три имитации лесного пожара (рис. 3). Их положение показано на рис. 1. Непосредственно под местом горения в шурфе на различных глубинах были расположены термодатчики. Один находился на поверхности грунта на значительном удалении от пятна горения для измерения температуры воздуха. В каждом случае заглубливание датчиков было различным и определялось ходом эксперимента. Максимальное заглубливание составило 80 см, а минимальное 5 см от дневной поверхности.

Модель формирования и развития субаквального талика годится для бессточных и малых озер, течения в которых отсутствуют, а также для случаев, когда распределения температуры окружающих водных масс примерно одинаковы, т. е. их физическое перемещение в расчетную точку не привносит искажения поля температур. Аналогичная модель для субаэрального талика подходит для всех типов пород. Обе они построены по единому принципу и различаются лишь наличием либо отсутствием слоя воды. В основу положено численное решение одномерной многофазной задачи Стефана. Верхним граничным условием является теплообмен с атмосферой, а нижним — температура многолетнемерзлых пород на некоторой глубине. Поскольку теплофизические параметры существенно зависят от влажности, в модели также рассматривается насыщенная и ненасыщенная фильтрация воды в грунт. Помимо этого, учитывается испарение с поверхности, выпадение дождей, а также наличие снежного покрова и его фирнизация.

Согласно результатам математического моделирования, выполненного с помощью авторской программы FrozenSoil и базы теплофизических и механических свойств грунтов, горных пород, напочвенного слоя, снега, фирна и льда, для открытых участков местности, сложенных песчаными отложениями, на которых практически отсутствует напочвенный слой мха, характерны постепенная деградация криолитозоны и увеличение мощности талика. Наличие деревьев, кустарников и напочвенного покрова уменьшает поток солнечной радиации, падающей на поверхность, и поток тепла, проходящего внутрь грунта. Это, в свою очередь, препятствует прогрессивному развитию талика, а при большой сплоченности растительности даже приводит к его промерзанию.

Моделирование также показало, что основной причиной формирования и развития талика в районе исследования (Центральная Якутия) является наличие снежного покрова. Слой мха препятствует нагреву грунта в летний период и не способствует формированию талика. Его теплоизолирующие свойства, с одной стороны, консервируют имеющийся теплозапас грунта, а с другой — препятствуют его выхолаживанию за счет низкой температуры окружающего воздуха. Кроме того, большое значение имеет конкретный тип напочвенного покрова, поскольку различные мхи, лишайники и кустарники характеризуются различными теплофизическими коэффициентами. Это влияет на формирование таликовых зон. Важным обстоятельством является тот факт, что смена климата может привести к смене типа напочвенного покрова, что, как показало моделирование, непременно скажется на процессах развития как таликов, так и многолетнемерзлых пород.

Понимание важности изучения процессов, протекающих в криолитозоне, нашло отражение в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года», утвержденной Указом Президента РФ № 645 от 26.10.2020, а также в Постановлении Правительства РФ № 1831 от 1.11.2023 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 9 августа 2013 г. № 681». В последнем документе прямо указывается на создание «государственного фонового мониторинга состояния многолетней (вечной) мерзлоты», что подчеркивает важность и значимость тематики проводимых исследований.

*Авторы благодарят своих коллег Н.А. Павлову, В.С. Ефремова и В.В. Огонерова (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН) за помощь в организации полевых работ; Г.В. Пряхину, В.А. Распутину, А.М. Малышеву и Д.О. Андрееву (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в проведении полевых работ. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозерные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».*

*С.В. Попов (АО «ПМГРЭ»),  
С.Р. Шерстенникова (СПбГУ), А.С. Боронина (ГГИ),  
А.В. Немчинова (СПбГУ), Л.С. Лебедева (ИМ СО РАН).  
Фото авторов.*