

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.345.2

DOI: 10.15372/KZ20230201

ТЕМПЕРАТУРА ПОРОД В СЛОЕ ГОДОВЫХ ТЕПЛОБОРОТОВ
В РАЙОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИЛ.С. Лебедева^{1,*}, Н.Е. Баишев¹, Н.А. Павлова¹, В.С. Ефремов¹,
В.В. Огонеров¹, А.М. Тарбеева²¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*Автор для контакта, lyudmilaslebedeva@gmail.com

Несмотря на низкие средние годовые температуры воздуха и малое количество атмосферных осадков, в некоторых условиях сплошной криолитозоны Центральной Якутии существуют субаэральные надмерзлотные водоносные талики. В статье приводится анализ сезонной и межгодовой динамики температуры пород в контрастных геокриологических условиях – на участках распространения мерзлоты с поверхности и надмерзлотных субаэральных таликов на ключевом участке Левая Шестаковка, расположенном в 20 км юго-западнее г. Якутска. Кровля многолетней мерзлоты на участке залегает на глубинах от 0.5 до 20 м. Самые высокие температуры пород характерны для площади распространения водоносных надмерзлотных таликов, приуроченных к пологим склонам, которые сложены песчаными отложениями и покрыты редким сосновым лесом. Мощность сезонномерзлого слоя достигает 3 м, а глубина нулевых годовых амплитуд варьирует от 6 до 12 м. Талые породы сохраняются за счет постоянной фильтрации подземных вод в них. Самая низкая температура пород характерна для маревого участка и поймы реки. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0.5 до 1.0 м, глубина нулевых годовых амплитуд превышает 15 м. В последние годы отмечено медленное промерзание таликов снизу за счет слабовыраженного охлаждения толщи, подстилающей талые водоносные породы. За пределами развития таликов зафиксированы слабые разнонаправленные изменения температуры пород.

Ключевые слова: надмерзлотные талики, температура слоя годовых теплооборотов, Центральная Якутия, песчаные отложения, подземные воды, сезонноталый слой, сезонномерзлый слой, сплошная криолитозона.

Ссылка для цитирования: Лебедева Л.С., Баишев Н.Е., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М. Температура пород в слое годовых теплооборотов в районе распространения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 2, с. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20230201.

GROUND TEMPERATURE AT THE DEPTH OF ZERO ANNUAL AMPLITUDE IN THE AREA
OF SUPRAPERMAFROST TALIKS IN CENTRAL YAKUTIAL.S. Lebedeva^{1,*}, N.E. Baishev¹, N.A. Pavlova¹, V.S. Efremov¹, V.V. Ogonerov¹, A.M. Tarbееva²¹ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia*Corresponding author, lyudmilaslebedeva@gmail.com

Despite the low mean annual air temperature and low precipitation, subaerial suprapermafrost aquifer taliks are formed in some cases in the continuous permafrost zone of Central Yakutia. The paper presents an analysis of the seasonal and interannual dynamics of ground temperature in contrasting geocryological conditions – in areas of permafrost spread from the surface and in suprapermafrost subaerial taliks – of the key area of Levaya Shestakovka 20 km southwest of Yakutsk. The permafrost table in this area occurs at depths from 0.5 to 20 m. The highest ground temperatures are typical of the area of aquiferous suprapermafrost taliks confined to gentle slopes composed of sandy sediments and covered with pine woodland. The thickness of the seasonally frozen layer reaches 3 m, and the depth of zero annual amplitudes varies from 6 to 12 m. Thawed deposits are

preserved due to the continuous filtration of groundwater in them. The lowest ground temperatures are characteristic of the mire and the river floodplain. The depth of seasonal thawing varies from 0.5 to 1.0 m, and the depth of zero annual amplitudes exceeds 15 m. In recent years, slow freezing of the taliks from below has been noted due to mild cooling of the strata underlying the thawed aquifers. Beyond the area of taliks, weak multi-directional changes in ground temperature have been recorded.

Keywords: *suprapermafrost taliks, temperature at the depth of zero annual amplitude, Central Yakutia, sand deposits, groundwater, seasonally thawed layer, seasonally frozen layer, continuous permafrost.*

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемерзлые породы, распространенные в Центральной Якутии, имеют мощность от 200 до 700 м [Подземные воды..., 2003]. Сплошность криолитозоны прерывается сквозными таликами под крупными озерами и руслом р. Лены. Глубина сезонного протаивания пород изменяется от 0.3 до 4.5 м и зависит от типа ландшафта [Павлов, 1979; Анисимова и др., 2005; Варламов, Скрябин, 2012]. В бассейнах рек Лена и Вилюй известно существование локальных субаэральные надмерзлотных водоносных таликов [Пономарева, 1999; Бойцов, 2002]. Температурный режим пород в них отличается от окружающей территории. В естественных условиях вблизи г. Якутска температура водовмещающих песчаных отложений надмерзлотного талика в интервале глубин 3–6 м составляет около 0 °С в течение всего года [Лебедева и др., 2019], а вне него достигает –6.6 °С [Варламов, Скрябин, 2012]. В бассейне р. Вилюй на площадях, сложенных с поверхностных эоловыми отложениями и покрытых сосновым лесом толокняково-лишайниковым, мощность сезонномерзлого слоя (СМС) над таликами составляет 2.5–4.5 м [Пономарева, 1999; Лыткин и др., 2018]. Сезонный и межгодовой режим температуры пород на участках развития таликов и за его пределами до настоящего времени остается малоисследованным. Вопросы генезиса, распространения, геометрии, сезонной и межгодовой динамики таликов поднимаются редко [Шепелев, 2011; Анисимова, Павлова, 2014; Галанин, 2015; Семерня и др., 2018]. Реакция температуры пород на участках, где распространены надмерзлотные талики, на потепление климата не определена.

Известно, что современное повышение температуры воздуха приводит к неравномерной деградации верхней части криолитозоны. За 25-летний период наблюдений в конце прошлого века на торфяниках севера Западной Сибири не установлено увеличения мощности сезонноталого слоя (СТС) [Москаленко, 1998]. По данным [Васильев и др., 2020], в южной тундре и лесотундре Западной Сибири кровля многолетнемерзлых пород (ММП) опустилась на 2–10 м, в зоне северной тайги – на 4–6 м, и на некоторых участках сформировались надмерзлотные талики. На северо-востоке европейской территории России наблюдения на бурых торфяниках за пятилетний период пока-

зали, что мощность СТС увеличивается [Каверин и др., 2019]. На территории Тимано-Печорского региона с 1970-х гг. зафиксировано отступление границы ММП на север. К 2008 г. она сместилась к северу на 30–40 км в Печорской низменности, на окольных равнинах Приуралья – до 80 км [Оберман, Лыгин, 2009]. Площадь сплошного распространения ММП сократилась за счет возникновения новых таликов и частичного перехода их в прерывистую мерзлоту.

В Северной Якутии прослеживается тенденция повышения температуры пород в тундре и тайге с конца 1990-х гг. [Федоров-Давыдов и др., 2018]. По данным [Boike et al., 2019], здесь температура пород на подошве слоя годовых теплооборотов повысилась с начала 2000-х гг. на 2–3 °С. В отдельные годы (2007–2008 и 2010–2011) глубина сезонного протаивания пород увеличивалась на 10–20 % от нормы.

На территории Центральной Якутии с середины 1960-х гг. наблюдается интенсивный рост температуры воздуха [Горохов, Федоров, 2018; Нерадовский, 2020]. При этом одни исследователи отмечают, что увеличение мощности СТС и повышение температуры мерзлых пород выражены слабо [Павлов и др., 2002; Varlamov et al., 2020]. Так, С.П. Варламов отмечает, что “современный период в целом характеризуется достаточной термической устойчивостью как высокотемпературных, так и низкотемпературных многолетнемерзлых пород” [Варламов и др., 2021, с. 76]. Другие авторы показывают, что на открытых (безлесных) участках на протяжении трех последних десятилетий наблюдается рост температуры пород до 0.5 °С с увеличением глубины сезонного протаивания, активизацией термокарстовых просадок на участках развития повторно-жильных льдов и суффозионных процессов в областях разгрузки межмерзлотных вод [Гагарин и др., 2016; Fedorov et al., 2014].

В Южной Якутии мощность СТС существенно не меняется [Заболотник С., Заболотник П., 2014]. Во многих других регионах криолитозоны на фоне глобального потепления климата понижается среднегодовая температура ММП, увеличивается льдистость пород и уменьшается мощность СТС [Конищев, 2009; Biskaborn et al., 2019].

Целью настоящей работы является анализ сезонной и межгодовой динамики температуры по-

род в контрастных геокриологических условиях – на участках распространения мерзлоты с поверхности и надмерзлотных субаэральных таликов на ключевом участке Левая Шестаковка, расположенного в 20 км юго-западнее г. Якутска.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок Левая Шестаковка площадью около 1 км² расположен в бассейне р. Шестаковка, левого малого притока Лены, на пологом склоне денудационной равнины с абсолютными отметками 190–210 м [Мониторинг..., 2002] (рис. 1).

Климат района исследования резко континентальный с суровой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Средняя годовая температура воздуха на ближайшей метеорологической станции в г. Якутске за период 1920–2019 гг. составляет –9.5 °С, средняя многолетняя температура января –40.5 °С, июля +19.1 °С. Среднее годовое количество осадков с 1937 по 2015 г. равно 268 мм/год, из них жидких – 160 мм/год, смешанных – 8 мм/год и твердых – 100 мм/год [Булыгина и др., 2022a].

В распадках, понижениях и на выровненных участках рельефа произрастают лиственнично-березовые леса. Сосновые леса занимают преимущественно склоны и водоразделы. Вдоль ручьев и озер развиты мари и заболоченные территории.

Верхнюю часть геологического разреза до глубины 30 м слагают рыхлые песчаные отложения с редкими прослоями глин [Бойцов, 1985]. На склонах и водоразделах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их объемная влажность в зоне аэрации не превышает 2–8 %. Песчаные отложения имеют кварцево-полевошпатовый состав, плотность скелета более 1.70 г/см³ и пористость 33–35 % [Бойцов, 2002]. В днищах долин ручьев и распадков увлажненные (15–25 %) пески перекрыты органомным слоем [Скрябин и др., 1999].

Рассматриваемая территория относится к области развития нестационарных мерзлых толщ, мощность которых в современный период достигает 400–500 м. Температура пород на глубине 100 м составляет –0.6...–1.0 °С [Бойцов, 1985], а на подошве слоя нулевых годовых амплитуд в зави-

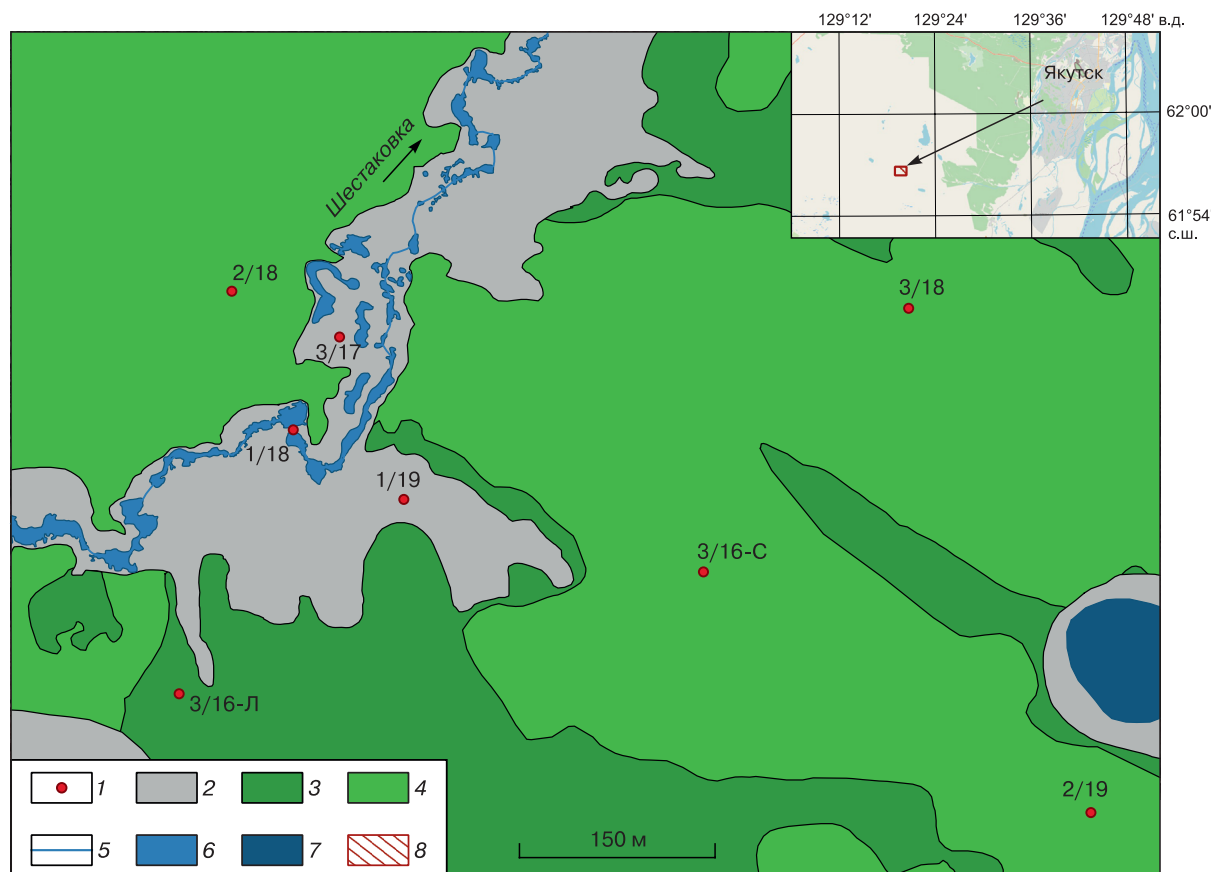


Рис. 1. Схема расположения термометрических скважин в бассейне р. Шестаковка:

1 – скважина; 2 – пойма реки и марь; 3 – лиственничный лес; 4 – сосновый лес; 5 – река; 6 – расширения русла реки; 7 – озеро; 8 – участок исследования на карте-врезке.

симости от ландшафта изменяется от положительных (близких к 0 °С) значений до –2...–3 °С и ниже [Варламов, Скрябин, 2012]. Мощность СТС изменяется от 4 м на пологих склонах и водоразделах, покрытых сосновым лесом, до 0.5 м на марях. На правобережной террасе р. Левая Шестаковка бурением установлен надмерзлотный субаэральный водоносный талик шириной 180–200 м и протяженностью более 500 м. По результатам геофизических исследований, талик имеет сложный контур и несколько водопроводящих рукавов, а его мощность изменяется от 3 до 20 м [Лебедева и др., 2019]. В мерзлотно-ландшафтном отношении он приурочен к пологому участку с сосновым лесом толокнянково-лишайниковым.

Маломощные (до 3 м) водоносные субаквальные талики распространены под четковидными расширениями русла р. Левая Шестаковка. Они приурочены к участкам, на которых из-за большой глубины реки (до 4 м) в зимний период подо льдом сохраняется слой воды [Тарбеева и др., 2019].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бурение. На ключевом участке Левая Шестаковка с 2016 по 2019 г. было пробурено и оборудо-

вано восемь термометрических скважин в различных ландшафтных и геоморфологических условиях. Буровые работы производились в апреле, при максимальной мощности слоя сезонного промерзания пород. Четыре скважины расположены на участке распространения соснового леса (см. рис. 1, таблицу). В березово-лиственничном лесу, на мари, на затапливаемой пойме и в русле р. Шестаковка пробурено по одной термометрической скважине.

Бурение выполнялось колонковым способом с отбором керна для определения влажности пород термостатно-весовым методом. Гранулометрический состав отложений из скважин 3/16-С и 3/16-Л определяли в поле, из остальных скважин – ареометрическим и ситовым методами в лабораторных условиях.

Мониторинг температуры пород на водосборе р. Шестаковка. Шесть термометрических скважин были оборудованы температурными косями, оснащенными датчиками Maxim Integrated DL18B20. Датчики температур были установлены через каждые 0.5 м до глубины 5 м и через каждый метр ниже глубины 5 м (см. таблицу). Точность измерения температуры термисторами DL18B20 составляет ±0.5 °С. Показания снимались в руч-

Характеристики температурных скважин

Номер скважины	Глубина, м	Наличие талика	СТС, м	СМС, м	Глубина нулевых годовых амплитуд, м	Состав грунтов	Расположение	Наличие данных	Установленные датчики
3/16-С	6	Да	–	<3.0	<6	Мелко- и среднезернистые пески	Сосновый лес	04.2016–09.2019	Логгер, 4 датчика на глубинах 0.5, 1.0, 3.0 и 6.0 м
3/16-Л	3	Нет	>1.0	–	*	Мелко- и среднезернистые пески	Лиственничный лес	04.2016–09.2019	Логгер, 4 датчика на глубинах 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0 м
3/17	20	Нет	0.5–1.0	–	20	Торф, суглинки, супеси и пески	Пойма реки	04.2017–10.2020	26 датчиков: каждые 0.5 м с 0 по 5 м и каждый метр с 5 до 20 м
1/18	12	Нет	2.5	–	15	Торф, супеси, мелко- и среднезернистые пески	Участок узкого русла реки	04.2018–10.2020	18 датчиков: каждые 0.5 м с 0 по 5 м и каждый метр с 5 по 12 м
2/18	15	Нет	4.5	–	5	Суглинки, супеси, мелко- и среднезернистые пески	Сосновый лес	04.2018–10.2020	21 датчик: каждые 0.5 м с 0 по 5 м и каждый метр с 5 по 15 м
3/18	11.6	Да	–	3.0	10	Мелко- и среднезернистые пески	Сосновый лес	04.2018–10.2020	16 датчиков: каждые 0.5 м с 0 по 5 м и каждый метр с 5 по 10 м
1/19	16.8	Нет	<1.0	–	>15	Торф, суглинки, супеси, пылеватые, мелко- и среднезернистые пески	Марь	04.2019–10.2020	21 датчик: каждые 0.5 м с 0 по 5 м и каждый метр с 5 по 15 м
2/19	21	Да	–	3.0	>11.5	Средне- и крупнозернистые пески	Сосновый лес	04.2019–10.2020	17 датчиков: каждые 0.5 м с 0 по 4.5 м и каждый метр с 4.5 по 11.5 м

Примечание. Тире – не применимо; звездочка – нет данных.

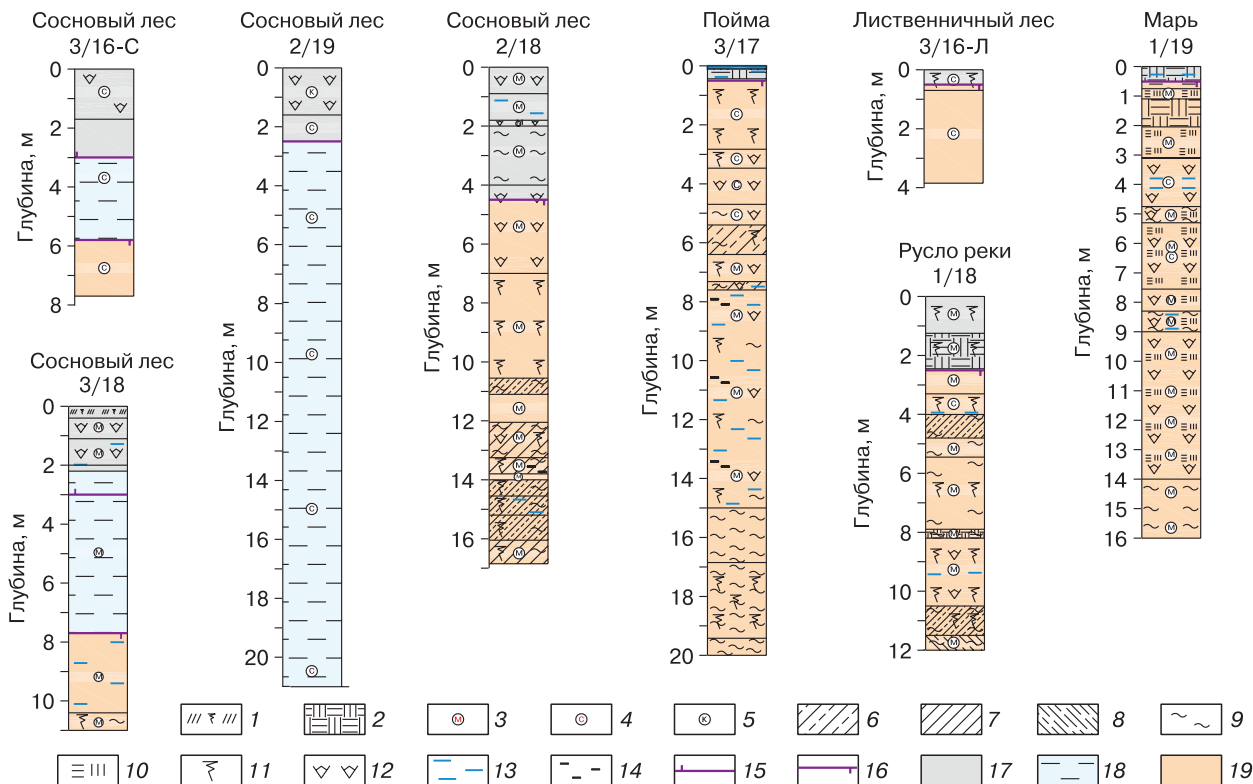


Рис. 2. Геологические колонки по скважинам в верхней части бассейна р. Шестаковка:

1 – почвенно-растительный слой; 2 – торф; 3 – песок мелкий; 4 – песок средний; 5 – песок крупный; 6 – супесь; 7 – суглинок; 8 – переслаивание супеси и суглинка; 9 – алеврит; 10 – заторфованность; 11 – остатки органики; 12 – железистость; 13 – льдистость; 14 – углистость; 15 – нижняя граница сезонномерзлого слоя; 16 – верхняя граница ММП; 17 – деятельный слой; 18 – водоносные талики; 19 – многолетнемерзлые породы.

ном режиме раз в месяц. Две скважины (3/16-С и 3/16-Л) были оборудованы температурными логгерами Onset HOBO U12. Запись производилась каждые три часа. Точность измерения температуры термисторами Onset составляет $\pm 0.25^\circ\text{C}$ в диапазоне температур $0-50^\circ\text{C}$ и $\pm 0.5^\circ\text{C}$ при -20°C . П.Я. Константинов с соавторами [2011] показали, что, как правило, ошибка термисторов не выходит за пределы $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

На метеорологической станции Onset HOBO в 2.5 км от ключевого участка фиксировались температура приземного воздуха, количество жидких атмосферных осадков и другие базовые метеорологические параметры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Строение верхней части геологического разреза на ключевом участке

Основными ландшафтными единицами на ключевом участке являются три группы фаций. Они представлены пологими склонами, покрытыми сосновым лесом; эрозионными распадками (понижениями), в пределах которых выделены

участки с преобладанием лиственничного леса и мохово-травяных болот (маревые участки); днищем долины р. Шестаковка, включающей пойму и русло реки. Абсолютные отметки поверхности рельефа изменяются от 200–204 м на выположенных песчаных склонах до 189–192 м в распадках и на пойме р. Левая Шестаковка.

На участках, покрытых сосновым лесом, напочвенный покров разреженный и представляет собой опад сосновой хвои и отдельные заросли брусники и толокнянки. Геологический разрез до глубины 21 м представлен песками от алевритистых до крупнозернистых (рис. 2). Так, на правом берегу р. Левая Шестаковка, в 640 м от ее русла, на очень пологом склоне ($1-2^\circ$) скважиной 2/19 глубиной 21 м сверху вскрыты среднезернистые пески мощностью 4.9 м, которые сменяются серыми крупнозернистыми песками.

В скважине 3/16-С, в 300 м от бровки надпойменной террасы реки, по всему разрезу (до глубины 10 м) вскрыты желтовато-серые среднезернистые пески с признаками ожелезнения и редкими включениями органики. Вблизи границы соснового и лиственничного леса, по данным бурения

скважины 3/18 глубиной 11.6 м, геологический разрез представлен мелкозернистыми песками. В верхней его части (до глубины 40 см) пески гумусированные с включениями корней растений, до глубины 2.2 м – ожеженные рыжие и светло-серые, под ними залегают сизо-серые пески, в основании разреза с включением алевритовой фракции и органического вещества.

Скважинами 2/19, 3/16-С и 3/18 при их бурении водоносный талик вскрыт в интервале глубин 2.5–18.0, 1.7–7.2 и 2.2–7.7 м соответственно. Весовая льдистость песков СМС в апреле увеличивалась вниз по разрезу от 1.5–2 до 8.3–10 %, и непосредственно у кровли водоносного горизонта она составляла 17.6–20 %. Многолетнемерзлые отложения в кровле имели льдистость от 18.3–19.6 до 33–35 %.

На левобережье реки в сосновом лесу скважиной 2/18 глубиной 16.85 м вскрыты мелкозернистые пески. Сверху залегают светло-желтые пески с признаками ожежения и редкими включениями суглинка. Мощность этих отложений составляет 2 м. Их подстилают до глубины 7 м мелко- и тонкозернистые алевритистые светлые желтовато-серые и сизовато-серые пески с горизонтами ожежения. Глубже вскрыты мелкозернистые серые пески с остатками органики, тонкими прослоями зеленовато-серых сизоватых супесей и алевритистых суглинков с признаками ожежения в интервале глубин 11.1–13.5 м. Породы по всему разрезу мерзлые.

На участке распространения березово-лиственничного леса скважиной 3/16-Л глубиной 3.9 м вскрыты однородные мерзлые серые и бурые среднезернистые пески с включениями органики. Льдистость пород составила от 16.3 до 22.3 %.

Геологическое строение низкой левобережной поймы в расширении долины р. Левая Шестаковка подробно описано А.М. Тарбеевой [2019] по данным бурения скв. 3/17 глубиной 21 м. С поверхности под оторфованной подстилкой залегают мелко- и среднезернистые пески с прослоями гравия и торфа до глубины 4.7 м. Их подстилают алевритистые супеси с прослоями торфа. Под ними в интервале глубин 7.8–16.9 м вскрыты мелкозернистые пески с прослоями растительных остатков. В основании разреза залегают алевритистые супеси и пылеватые пески. Все отложения на момент бурения скважины находились в мерзлом состоянии. Влажность их была максимальной в приповерхностном оторфованном горизонте (>40 %), она изменялась от 17 до 35 % в интервале глубин 1–14 м и уменьшалась до 14–15 % на глубинах 18 и 20 м.

В русле р. Левая Шестаковка скважина 1/18 вскрыла с поверхности до глубины 4 м серые, бурые и желтоватые мелко- и среднезернистые пе-

ски с включениями и тонкими прослоями органики и торфа. До глубины 4.8 м их подстилают алевритистые сизо-серые супеси и легкие суглинки с многочисленными шширами льда. В интервале глубин 4.8–10.5 м разрез представлен алевритистыми тонко- и мелкозернистыми песками с прослоями органики и признаками ожежения. Эти отложения до глубины 12 м подстилаются алевритистыми сизо-серыми супесями с переслаиванием легких суглинков и серых алевритистых тонкозернистых песков. В апреле породы по всему разрезу мерзлые. Льдистость отложений варьировала от 16 до 25.6 %, увеличиваясь на глубинах 0.3–0.5 м (29.0–49.5 %) и 4.0–4.5 м (31.0–59.4 %).

На маревом участке на правом берегу р. Левая Шестаковка геологический разрез изучен до глубины 16 м в процессе бурения скв. 1/19. Здесь под слоем льдистого торфа 0.7 м вскрыты переслаивающиеся ожеженные мелко- и среднезернистые пески с торфом. Мощность этих отложений 3.1 м. Их подстилают среднезернистые сизовато-серые пески с пятнами ожежения и включениями органики, которые с глубины 4.8 м сменяются алевритистыми песками. С глубины 5.3 до 8.3 м залегают мелко- и среднезернистые пески с прослоями органики и ожежением, в нижней части интервала – с включениями суглинка и льда. Глубже до забоя скважины вскрыты мелкозернистые алевритистые пески с прослоями органики и ожежением. Породы по всему разрезу мерзлые.

По результатам буровых работ, выполненных в 2016–2019 гг., на правобережье р. Левая Шестаковка в пределах изучаемой площади установлено наличие водоносных таликов на участках распространения соснового леса в разрезах, представленных песчаными отложениями. На левобережье реки в схожих ландшафтных условиях вскрыты мерзлые породы. Вероятными причинами отсутствия здесь талика является более дисперсный состав отложений (присутствие в разрезе мелкозернистых песков, супесей, суглинков и алевритистых песков), а также большая крутизна склона, способствующая быстрому стоку поверхностных и надмерзлотных вод в реку. За пределами распространения сосновых лесов талые породы не обнаружены независимо от состава отложений. Ранее, при исследовании субаэральных таликов в районе оз. Малая Чабыда, в 5 км от изучаемого участка, А.В. Бойцовым [2002] была установлена важная роль в формировании такого рода таликов особенностей внутригодового перераспределения влажности песчаных пород зоны аэрации: влажность талых песков всегда выше мерзлых, что приводит к формированию положительной температурной сдвижки на подошве СТС за счет разности коэффициентов теплопроводности пород в мерзлом и талом состоянии.

Температурный режим пород

Ход температур пород во времени на глубинах 3, 6 и 10 м показан на рис. 3, значения мощности деятельного слоя (СТС или СМС) и глубина нулевых годовых амплитуд приведены в таблице.

По данным геотермических наблюдений в скв. 3/17, на пойме реки мощность СТС не пре-

вышает 1 м. На этой глубине температура изменяется от $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ноябре–декабре до $-18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в феврале. Сезоннотальный слой начинает формироваться в конце апреля–начале мая и полностью промерзает в октябре. На глубинах 10 и 20 м температура пород варьирует от -4.7 до $-6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и от -3.6 до $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Время запаздыва-

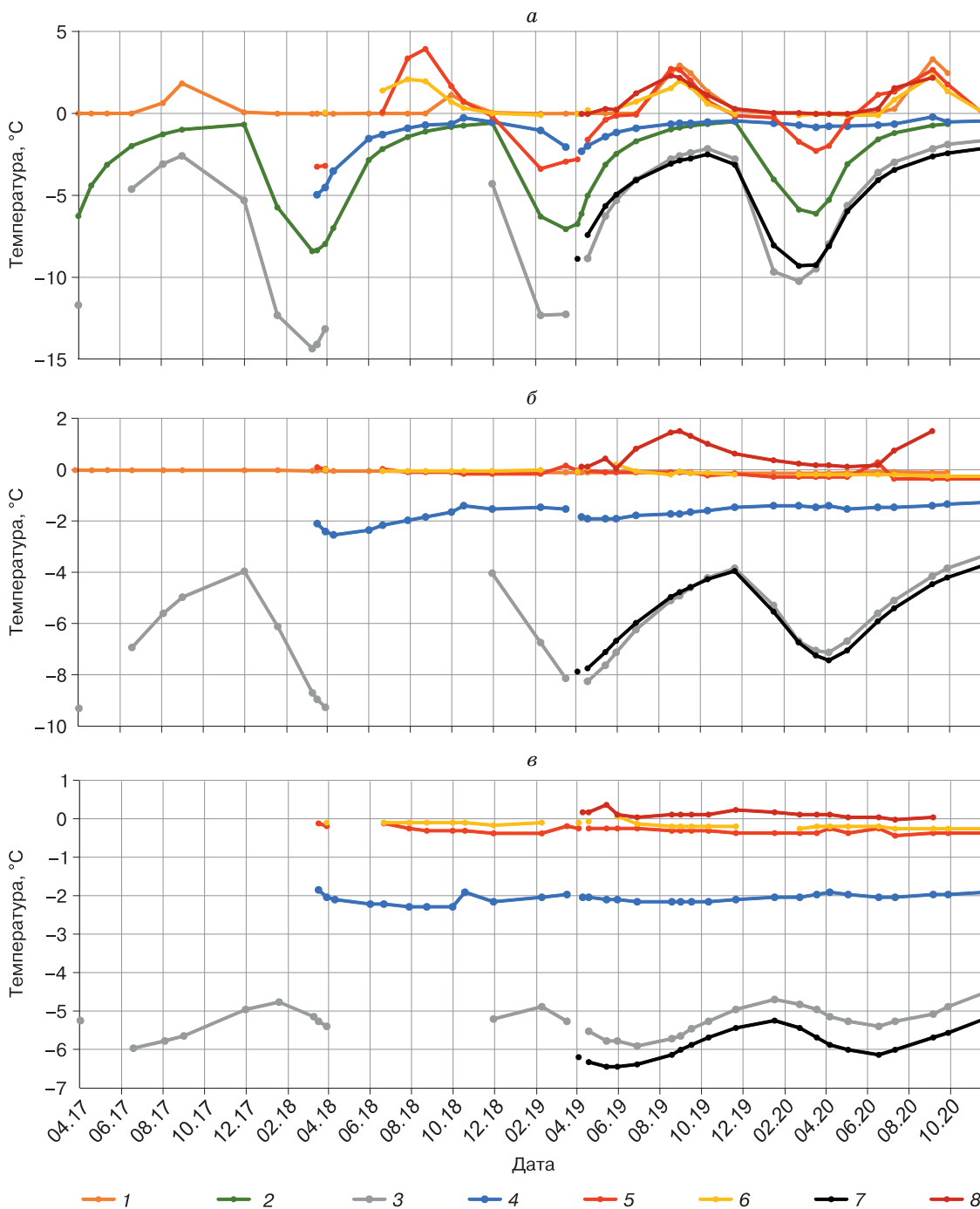


Рис. 3. Изменение температуры пород на глубинах 3 м (а), 6 м (б) и 10 м (в) с апреля 2017 по ноябрь 2020 г. в скважинах:

1 – 3/16-С; 2 – 3/16-Л; 3 – 3/17; 4 – 1/18; 5 – 2/18; 6 – 3/18; 7 – 1/19; 8 – 2/19.

ния ее колебаний на глубине 16–18 м составляет 9–10 месяцев. На глубине 20 м сезонные колебания не фиксируются.

На участке скв. 1/18 под промерзающим узким руслом р. Левая Шестаковка протаивание пород начинается в конце апреля–начале мая, полностью они промерзают в ноябре–декабре. Мощность СТС составляет 2.5 м. На этой глубине температура пород изменяется от 0 до -4.7°C , на глубине 10 м она колеблется в пределах от -1.9 до -2.3°C , а на глубине 12 м – от -2.1 до -2.5°C . Время прохождения температурной волны от поверхности земли до глубин 10–12 м около 10 месяцев. Мощность слоя годовых теплооборотов составляет 15 м. Прослеживается слабая тенденция к увеличению температуры пород на глубинах 6–12 м за два года измерений. Под озеровидными расширениями (четками) р. Левая Шестаковка, в которых зимой подо льдом сохраняется слой воды высотой более 2 м, имеются локальные талики мощностью до 8 м [Тарбеева и др., 2019]. Связь подрусловых и склоновых субаэральных таликов, по-видимому, в зимний сезон отсутствует. Об этом свидетельствует смыкание СТС с ММП на пойме р. Левая Шестаковка и на присклоновой мари в октябре.

По результатам геотермических измерений в скв. 1/19, на маревом участке мощность СТС менее 1 м. На этой глубине температура пород изменяется от -0.7 до -12.4°C , на глубинах 10 и 15 м она изменяется от -5.3 до -6.5°C и от -5.3 до -5.6°C соответственно. Годовые ее колебания достигают глубины 15 м, как и на пойме реки, с задержкой 9–10 месяцев. Мощность слоя нулевых годовых амплитуд составляет 17–18 м.

По результатам измерений в лиственничном лесу (скв. 3/16-Л), мощность СТС несколько превышает 1 м. На этой глубине температура пород колеблется от $+0.2$ до -11.3°C , на глубине 3 м – от -0.6 до -8.4°C . Разрез находится в мерзлом состоянии.

В скв. 2/18 на левом борту долины р. Шестаковка на участке соснового леса мощность СТС достигает максимального значения среди всех исследуемых разрезов – 4.5 м. На 5, 10 и 15 м тем-

пература за период наблюдений варьирует в пределах $0...-0.2$, $-0.3...-0.4$ и $-0.3...-0.5^{\circ}\text{C}$ соответственно. С августа 2018 по октябрь 2020 г. отмечалось охлаждение грунтов по всей глубине на $0.2-0.3^{\circ}\text{C}$. В теплые многоснежные зимы после влажного лета здесь возможно формирование перезимков талых пород.

Температурный режим пород на участке распространения надмерзлотного субаэрального талика. На участках скважин 3/18, 2/19 и 3/16-С, вскрывших надмерзлотный субаэральный талик, мощность СМС в период наблюдений составляла 2.0–3.5 м. Максимальная глубина проникновения изотермы -0.1°C отмечена в скв. 2/19, а минимальная – на участке скв. 3/16-С. Летом породы в подошве СМС прогревались до температуры $2.1-2.9^{\circ}\text{C}$. В интервале залегания водоносного талика температура пород изменялась от 0°C в зимние месяцы до 2.3°C в сентябре–октябре. Подстилающие талик многолетнемерзлые отложения имеют высокую отрицательную температуру ($-0.1...-0.3^{\circ}\text{C}$). Мощность слоя годовых теплооборотов составляет 6–12 м.

В целом на участках распространения надмерзлотного субаэрального талика мощность СМС оставалась стабильной за период наблюдений, однако сроки начала его формирования и экстремумы температур пород варьировали год от года. Так, по данным, полученным по скв. 3/16-С, фронт сезонного промерзания пород достиг глубины 0.5 м в 2016 г. в октябре, а в 2017–2020 гг. – в ноябре (рис. 4). Средние суточные температуры на этой глубине зимой обычно не опускаются ниже -14°C . Отличается лишь зима 2017/18 г., когда средняя суточная температура пород на глубине 0.5 м понизилась до -17°C , в результате в последующий летний период 2018 г. нижележащие талые водоносные пески прогрелись до меньших значений и на более короткое время, чем за предыдущие годы, однако в 2019–2020 гг. этот эффект был нивелирован.

Протаивание пород СМС в период наблюдений начиналось в середине апреля и достигало глубины 0.5 м в мае. Положительные средние месячные температуры пород зоны аэрации на глу-

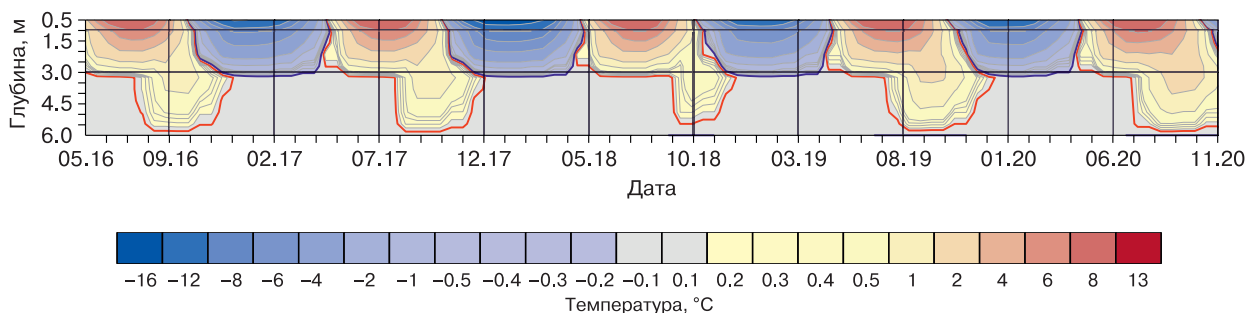


Рис. 4. Динамика температуры пород в скв. 3/16-С с мая 2016 по ноябрь 2020 г.

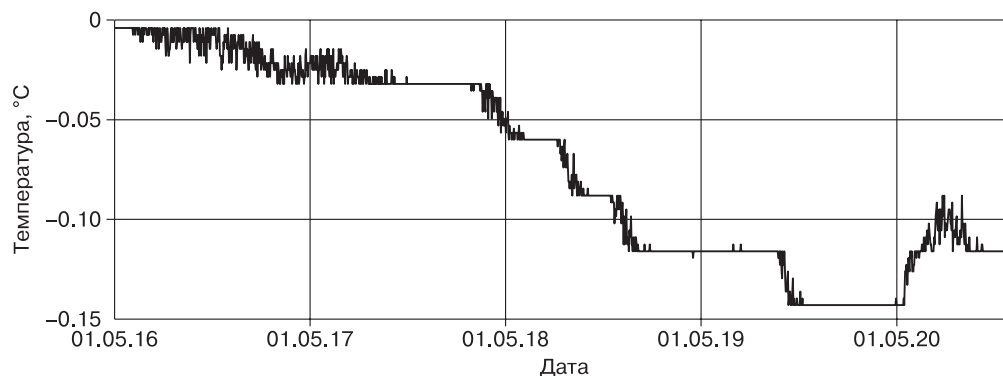


Рис. 5. Изменение средней суточной температуры пород на глубине 6 м в скв. 3/16-С.

бине 0.5 м отмечались с мая по сентябрь или октябрь, на глубине 1 м – с мая по октябрь, а на глубине 3 м – с августа по декабрь во все годы наблюдений, кроме 2018 г., когда температура была выше 0°C только с октября по декабрь. В остальное время года температура пород на глубине 3 м равна 0°C .

На глубине 6 м с мая 2016 по ноябрь 2020 г. прослеживалось постепенное охлаждение пород на 0.2°C (рис. 5) и аградация мерзлоты, а в 2020 г. вновь началось повышение их температуры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Самые низкие значения температуры пород, малая мощность СТС (около 1 м) и большая глубина проникновения годовых температурных колебаний (>15 м) отмечены в скважинах 3/17 и 1/19, пробуренных на пойме и маревом участке соответственно. Близкие мерзлотные условия отмечены на участке скв. 3/16-Л, которая расположена в лиственничном лесу. В целом значения и характер изменения температуры пород в пойме и на мари практически идентичны с поверхности земли до глубины 6–7 м. С глубины 8 м в течение всего года на маревом участке породы охлаждены на 0.5 – 1.0°C больше, чем на пойме. В понижении, занятом лиственничным лесом, горные породы имеют температуру выше, чем на маревом участке и пойме реки: на глубине 1 м на 7 – 9°C зимой и 0.2 – 0.5°C летом, на глубине 3 м – на 5 – 6°C зимой и 1.5 – 2.0°C летом. Низкие температуры пород в этих ландшафтах обусловлены наличием влажного органогенного горизонта, теплопроводность которого в зимний период выше, чем летом. Так, мощность высокольдистого торфа на мари составляла 0.75 м, на пойме – 0.32 м, в лиственничном лесу на поверхности развит сплошной моховой покров высотой до 0.3 м.

Кроме того, в конце осени и в начале зимы, когда начинается промерзание пород и формируется снежный покров, на маревом участке и на

пойме реки происходит разгрузка надмерзлотных вод на поверхность. Образующаяся водоснежная масса замерзает в виде маломощной наледи. Так, в апреле 2017 г. в районе скв. 3/17 толщина льда на поверхности земли была 8 см. Наличие наледи уменьшает отепляющее воздействие снежного покрова и благоприятствует глубокому и интенсивному охлаждению пород зимой. В лиственничном лесу снежный покров накапливается в течение всего холодного сезона, что может объяснять относительно высокие температуры пород там, особенно зимой.

На выложенных склонах, покрытых разреженным сосновым лесом при практически полном отсутствии напочвенного покрова, мощность деятельного слоя достигает 4.5 м, а глубина нулевых годовых амплитуд составляет 5–12 м. Геологический разрез представлен здесь почти полностью песчаными отложениями. Три скважины вскрыли водоносные талики. По-видимому, отепление пород связано как с отсутствием органогенного горизонта на поверхности, так и с интенсивной фильтрацией надмерзлотных вод СТС и надмерзлотных грунтовых вод в песчаных отложениях, обладающих высокой пропускной способностью. Водонасыщенные породы в интервале талика имеют температуру около 0°C в течение всего года и не промерзают как из-за больших затрат холода, необходимых для перехода всей жидкой воды в лед, так и из-за постоянной фильтрации воды по порам и конвективного теплопереноса. Вероятно, большую роль в формировании температурного режима играют мощность зоны аэрации и глубина залегания кровли водоносного горизонта в талике. В скважинах 3/18 и 2/19, пробуренных в верхней части таликового склона, сезонные колебания температуры проникают до глубин 9–11 м, тогда как в других скважинах этой группы (3/16-С и 2/18) они затухают на глубинах 5–6 м. Это может объясняться более близким к поверхности уровнем надмерзлотных вод в верхней части склона.

Промежуточное положение между “теплыми” и “холодными” занимает участок в русле реки. Мощность СТС составляет здесь 2,5 м, а глубина залегания нулевых годовых амплитуд – около 15 м. По-видимому, сток в реке с мая по октябрь и отсутствие органогенного горизонта способствуют сохранению более высоких температур в разрезе по сравнению с участками на мари и пойме. Тем не менее супеси и суглинки, присутствующие в разрезе, ограничивают фильтрацию подземных вод, конвективный теплоперенос и формирование талых горизонтов. Как правило, протаявшие в теплый период породы к февралю–марту полностью промерзают.

Как показано на рис. 6, температура пород в скв. 3/16-С на глубине 6 м незначительно понизилась с нулевых значений в 2016 г. до -0.1 °С в 2020 г. Слабовыраженная тенденция к понижению температуры на глубинах 10–20 м характерна и для “теплых” скважин, расположенных на участке

распространения талика (скв. 3/18 и 2/19) и за его пределами (скв. 2/18). Длины ряда наблюдений недостаточно, чтобы сделать вывод о тренде, однако согласованность отмеченных изменений за 2–4 года по четырем скважинам позволяет заключить, что в эти годы происходило поднятие кровли ММП. На “холодных” участках наблюдаются разнонаправленные тенденции. В русле (скв. 1/18) и на пойме реки (скв. 3/17) прослеживалось слабое понижение температуры пород на 0.1 – 0.3 °С, тогда как на маревом участке (скв. 1/19) линейная аппроксимация свидетельствует о незначительном повышении температуры за последние полтора года. Отсутствие выраженного роста температуры пород согласуется с результатами анализа длительных (39 лет) геотермических наблюдений в районе исследований С.П. Варламова [2021], который пришел к выводу о стабильном термическом состоянии пород вне зависимости от типа местности и характера отложений.

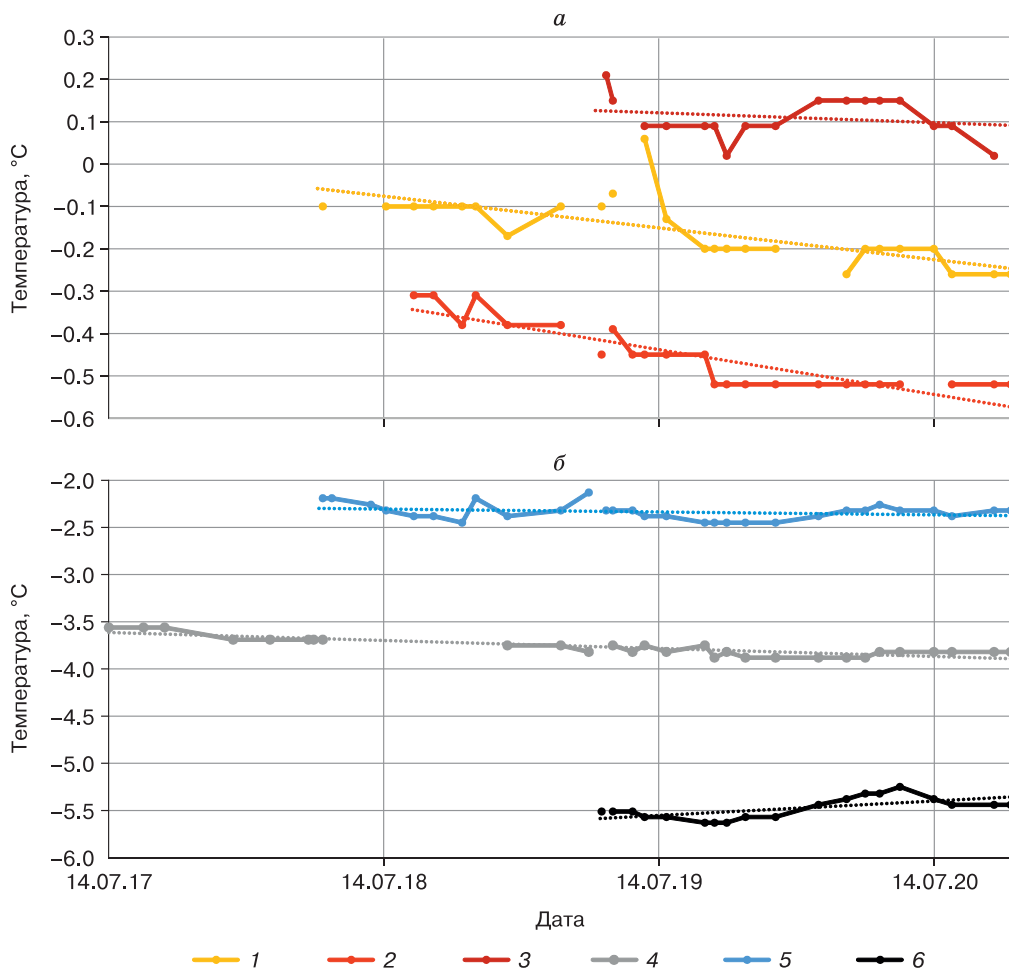


Рис. 6. Изменение температуры пород на глубинах 10–20 м в скважинах и линейная аппроксимация тренда:

a: 1 – скв. 3/18, 10 м; 2 – скв. 2/18, 15 м; 3 – скв. 2/19, 12 м; *б:* 4 – скв. 3/17, 20 м; 5 – скв. 1/18, 12 м; 6 – скв. 1/19, 15 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ключевом участке Левая Шестаковка площадью около 1 км² при едином метеорологическом фоне геотермические условия различны. Кровля многолетней мерзлоты залегает на глубинах от 0.5 до 20 м. Верхняя часть геологического разреза находится как в сезонномерзлом, так и в сезонноталом состоянии, в зависимости от состава и свойств отложений. Самые высокие температуры пород характерны для площади распространения водоносных надмерзлотных таликов, которые приурочены к пологим склонам, сложенным песчаными отложениями и покрытым редким сосновым лесом. На таких участках мощность СМС достигает 3 м, а глубина нулевых годовых амплитуд варьирует от 6 до 12 м. Талые породы сохраняются за счет постоянной фильтрации подземных вод в них. Присутствие в разрезе отложений с более низкими фильтрационными свойствами (супеси и суглинки) не благоприятствует существованию талика.

Самые низкие температуры пород характерны для маревого участка и поймы реки. Мощность СТС варьирует от 0.5 до 1.0 м, глубина нулевых годовых амплитуд превышает 15 м. Формированию низкотемпературной толщи способствуют наличие органогенного горизонта в верхней части разреза и небольшая высота снега из-за образования наледи.

В период с 2016 (2018) по 2020 г. отмечено медленное промерзание таликов снизу за счет слабо выраженного охлаждения толщи, подстилающей талые водоносные породы. За пределами развития таликов зафиксированы слабые разнонаправленные изменения температуры пород.

Установленное широкое распространение надмерзлотных субаэральных таликов на небольшом участке исследований в сплошной криолитозоне позволяет предположить возможность их существования в схожих ландшафтно-мерзлотных условиях на территории Центральной Якутии.

Благодарности. Мониторинг температуры пород выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00670). Бурение скважин и изучение геологического разреза выполнено в рамках НИОКТР 122012400106-7 “Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования”.

Литература

Анисимова Н.П. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2014, 198 с.

Анисимова Н.П., Павлова Н.А., Стамбовская Я.В. Химический состав вод таликов долины среднего течения реки Лены // Наука и образование, 2005, № 4 (40), с. 92–96.

Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1985, с. 44–55.

Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2002, 176 с.

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. 2022а. – <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.03.2022).

Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России: Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485. 2022б. – <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 15.03.2022).

Варламов С.П. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии / С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2021, 156 с.

Варламов С.П., Скрябин П.Н. Динамика теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии // Изв. Самар. научного центра РАН, 2012, № 14 (1–8), с. 2040–2044.

Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 2, с. 15–30.

Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С. Оценка термосуффузионных процессов в Центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2016, № 3, с. 252–262.

Галанин А.А. Криогенно-эоловый механизм формирования водоносных межмерзлотных таликов Центральной Якутии // Материалы XXI совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2015, с. 80–84.

Горохов А.Н., Федоров А.Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природ. ресурсы, 2018, № 2, с. 111–119.

Заболотник С.И., Заболотник П.С. Условия сезонного протаивания и промерзания грунтов в Южной Якутии // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 23–30.

Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б. и др. Влияние ландшафтных и климатических факторов на глубину сезонного протаивания в почвах бугристых торфяников (на примере площадки CALM R52) // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 62–71.

Коницев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2009, № 4, с. 10–20.

Константинов П.Я., Федоров А.Н., Мачимура Т. и др. Использование автоматических регистрирующих устройств (логгеров) для температурного мониторинга многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 23–32.

Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И. и др. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне р. Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 40–50.

Лыткин В.М., Галанин А.А., Шапошников Г.И. и др. Температурный режим дюнных массивов Центральной Яку-

тии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2018, т. 2, с. 237–240.

Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002, 172 с.

Москаленко Н.Г. Изучение сезонного протаивания торфяников в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 1, с. 32–35.

Нерадовский Л.Г. Изменение фоновой температуры мерзлых грунтов в Якутске в период потепления климата Сибири (1976–2011) // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 4, с. 46–57.

Оберман Н.Г., Лыгин А.М. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере Европейского северо-востока страны // Разведка и охрана недр, 2009, № 7, с. 15–20.

Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 284 с.

Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 4, с. 30–39.

Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / Отв. ред. Н.П. Анисимова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2003, 117 с.

Пономарева О.Е. Водоносные талики в песчаных отложениях бассейна нижнего течения р. Вилюй // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 84–89.

Семерия А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотно-водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 2, с. 29–38.

Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П. Потепление климата и изменение термического состояния грунтов в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 32–40.

Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Ефремов В.С. и др. Условия и процессы формирования четковидного русла малой реки криолитозоны (на примере р. Шестаковка, Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 38–49.

Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И. и др. Температурный режим почв Северной Якутии // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 4, с. 15–24.

Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2011, 169 с.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun., 2019, vol. 10, p. 264.

Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models // Earth Syst. Sci. Data, 2019, vol. 11, p. 261–299.

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.

Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station) // Land, 2020, No. 9 (5), p. 132.

References

Anisimova N.P., Pavlova N.A. Hidrogeokhimicheskie issledovaniya kriolitozony Tsentralnoy Yakutii [Hydrogeochemical Studies of Permafrost zone in Central Yakutia]. Novosibirsk, Acad. Publ. house "Geo", 2014, 198 p. (in Russian).

Anisimova N.P., Pavlova N.A., Stambovskaya Ya.V. The chemical composition of the waters of the taliks of the valley of the middle reaches of the Lena River. Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2005, No. 4 (40), p. 92–96 (in Russian).

Boitsov A.V. Conditions of formation and the regime of slope taliks in Central Yakutia. In: Hydrogeological Studies. Yakutsk, MPI SB RAS, 1985, p. 44–55 (in Russian).

Boitsov A.V. The conditions of formation and the regime of ground waters of suprapermfrost and intrapermfrost runoff in Central Yakutia: Candidate thesis (geology). Yakutsk, 2002, 176 p. (in Russian).

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii: Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh No. 2015620394. 2022a. – <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#opisanie-massiva-dannykh> (last visited: 15.03.2022).

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoy temperatury vozdukh na stantsiyakh Rossii: Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh No. 2014621485. 2022b. – <http://meteo.ru/data/156-temperature#opisanie-massiva-dannykh> (last visited: 15.03.2022).

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Monitoring teplovogo rezhima gruntov Tsentralnoy Yakutii [Monitoring of the thermal regime of soils in Central Yakutia]. Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2021, 156 p. (in Russian).

Varlamov S.P., Skryabin P.N. Dynamics of the thermal state of soils in permafrost landscapes of Central Yakutia. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, No. 14 (1–8), p. 2040–2044 (in Russian).

Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A. et al. Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the Western sector of the Russian Arctic. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 2, p. 14–26.

Gagarin L.A., Semernya A.A., Lebedeva L.S. Assessment of thermosuffusion processes in Central Yakutia on the example of the Ulakhan-Taryn site. Geoecology. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya [Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology], 2016, No. 3, p. 252–262 (in Russian).

Galanin A.A. Cryogenic-eolian mechanism of formation of aquifer interpermafrost taliks in Central Yakutia // Proceedings of the XXI meeting on groundwater in Siberia and the Far East. Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2015, p. 80–84 (in Russian).

Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current trends in climate change in Yakutia. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources], 2018, No. 2, p. 111–119 (in Russian).

Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S. Conditions of ground seasonal thawing and freezing in South Yakutia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 23–30 (in Russian).

Kaverin D.A., Pastukhov A.V., Novakovskiy A.B. et al. Landscape and climatic factors impacting the thaw depth in soils of permafrost peat plateaus (on the example of CALM R52 site). Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 53–60.

Konishchev V.N. Response of permafrost to climate warming. Vestnik MGU [Bulletin of Moscow State University]. Ser. 5. Geography, 2009, No. 4, p. 10–20 (in Russian).

- Konstantinov P.Ya., Fedorov A.N., Machimura T., Iwahana G., Yabuki H., Iijima Y., Costard F. Use of automated recorders (data loggers) in permafrost temperature monitoring. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2011, vol. XV, No. 1, p. 23–32 (in Russian).
- Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I. et al. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 1, p. 35–44.
- Lytkin V.M., Galanin A.A., Shaposhnikov G.I. et al. Temperature regime of dune massifs in Central Yakutia. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN*, 2018, vol. 2, p. 237–240 (in Russian).
- Monitoring podzemnykh vod kriolitozony [Groundwater monitoring in permafrost]. V.V. Shepelev, A.V. Boytsov, N.G. Oberman et al. *Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN*, 2002, 172 p. (in Russian).
- Moskalenko N.G. Investigation of the seasonal thaw of peatlands in the West Siberian cryolithozone. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 1998, vol. II, No. 1, p. 32–35 (in Russian).
- Neradovskii L.G. Changes in the background permafrost temperature in Yakutsk during current period of climate warming in Siberia (1976–2011). *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 4, p. 40–49.
- Oberman N.G., Lygin A.M. Forecasting the degradation of permafrost on the example of the European North-East of the country. *Razvedka i okhrana neдр [Exploration and protection of mineral resources]*, 2009, No. 7, p. 15–20 (in Russian).
- Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov [Thermal physics of landscapes]*. Novosibirsk, Nauka, 1979, 284 p. (in Russian).
- Pavlov A.V., Anan'eva G.V., Drozdov D.S. et al. Monitoring of active layer and the temperature of frozen grounds in the North of Russia. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2002, vol. VI, No. 4, p. 30–39 (in Russian).
- Podzemnye vody Tsentralnoy Yakutii i perspektivy ikh ispolzovaniya [Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use]. Ed. by N.P. Anisimova. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, fil. "Geo", 2003, 117 p. (in Russian).
- Ponomareva O.E. Aquiferous taliks in sandy sediments on the lower reaches of the Vilyui river. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 1999, vol. III, No. 4, p. 84–89 (in Russian).
- Semernya A.A., Gagarin L.A., Bazhin K.I. Cryohydrogeological features of the site of intrapermafrost aquifer distribution in the Eruu spring area (Central Yakutia). *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 2, p. 26–34.
- Skryabin P.N., Skachkov Yu.B., Varlamov S.P. Climat warming and thermal state of ground in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 1999, vol. III, No. 3, p. 32–40 (in Russian).
- Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Efremov V.S. et al. Conditions and processes of formation of a beaded channel of a small river in permafrost, Shestakovka River, Central Yakutia. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 33–44.
- Fedorov-Davydov D.G., Davydov S.P., Davydova A.I. et al. The temperature regime of soils in Northern Yakutia. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 4, p. 12–19.
- Shepelev V.V. Nadmerzlotnye vody kriolitozony [Suprapermafrost waters in the cryolithozone]. Novosibirsk, Acad.Publ. house "Geo", 2011, 169 p. (in Russian).
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, p. 264. – <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models, *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11, p. 261–299. – <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
- 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>
- Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of Climate Change on the Thermal Condition of Yakutia's Permafrost Landscapes (Chabyda Station). *Land*, 2020, No. 9 (5), p. 132. – <https://doi.org/10.3390/land9050132>

*Поступила в редакцию 6 мая 2022 г.,
после доработки – 11 декабря 2022 г.,
принята к публикации 1 февраля 2023 г.*