

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ
КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 550.37; 551.34

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)

НАДМЕРЗЛОТНЫЕ СУБАЭРАЛЬНЫЕ ТАЛИКИ
В БАССЕЙНЕ РЕКИ ШЕСТАКОВКА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)Л.С. Лебедева¹, К.И. Бажин¹, И.И. Христофоров¹, А.А. Абрамов², Н.А. Павлова¹, В.С. Ефремов¹,
В.В. Огонеров¹, А.М. Тарбеева³, М.П. Федоров⁴, Н.В. Нестерова⁵, О.М. Макарьева^{1,6}¹Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; lyudmilaslebedeva@gmail.com²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия⁴Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия⁵Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия⁶ООО "НПО "Гидротехпроект", 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 97, лит. А, пом. 3-Н, Россия

Представлены результаты бурения, геофизических работ и термометрического мониторинга на участке распространения надмерзлотного субаэриального водоносного талика, приуроченного к песчаным отложениям на пологом слабозадернованном склоне террасы р. Левая Шестаковка (Центральная Якутия), покрытом редким сосновым лесом. Талик шириной 180–200 м и протяженностью более 500 м имеет сложный контур и состоит из нескольких водопроницающих рукавов. Конфигурация талых зон, полученная по результатам георадиолокации и электротомографии, сходна, что подтверждает эффективность применявшихся геофизических методов. Среднее значение и амплитуда колебаний температуры пород за год на участке распространения талика значительно выше, чем за его пределами. Мощность слоя нулевых годовых амплитуд не превышает 6 м за счет неизменной в течение года температуры водонасыщенных пород, равной 0 °С.

Водоносный талик, многолетнемерзлые породы, температура пород, электротомография, георадиолокация

SUPRAPERMAFROST SUBAERIAL TALIKS,
CENTRAL YAKUTIA, SHESTAKOVKA RIVER BASINL.S. Lebedeva¹, K.I. Bazhin¹, I.I. Khristoforov¹, A.A. Abramov², N.A. Pavlova¹, V.S. Efremov¹,
V.V. Ogonerov¹, A.M. Tarbeeva³, M.P. Fedorov⁴, N.V. Nesterova⁵, O.M. Makarieva^{1,6}¹Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk,
677010, Russia; lyudmilaslebedeva@gmail.com²Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science, RAS,
2, Institutskaya str., Pushchino, Moscow region, 142290, Russia³Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia⁴Institute of Mining of the North, SB RAS, 43, Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia⁵Saint-Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia⁶Gidrotehproekt Ltd., 97, lit. A, 3-H, 14th line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia

The study presents the results of drilling, geophysical survey and ground temperature monitoring in the area of suprapermafrost subaerial water-bearing talik that is associated with sandy deposits in the sparsely vegetated gentle slope of the Levaya Shestakovka River terrace covered by pine forest. The talik is 180–200 m wide and more than 500 m long, has a complicated contour and consists of several water-conducting channels. The configuration of unfrozen zones assessed with a ground penetrating radar and electrical resistivity tomography is similar, thus confirming the efficiency of the applied geophysical methods. The mean value of ground temperature and its amplitude for one year at the talik area are much higher than outside of the talik. The depth of the zero annual amplitude does not exceed 6 m due to the constant yearly temperature of the water-saturated deposits equal to 0 °С.

Water-bearing talik, permafrost, soil temperature, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar

ВВЕДЕНИЕ

Центральная Якутия относится к сплошной криолитозоне мощностью в несколько сотен метров. Как считалось ранее, суровые климатические условия исключают развитие субэральных (радиационно-тепловых, по Н.Н. Романовскому [1983]) таликов. Тем не менее в Центральной Якутии известны субэральные над- и межмерзлотные водоносные талики на средневысотных надпойменных террасах рек Лена и Вилюй и на древней аккумулятивно-денудационной равнине. Они приурочены, как правило, к сухим слабозадренованным песчаным массивам, покрытым редким сосновым лесом [Катасонова, Толстов, 1963; Бой-

цов, Шепелев, 1976; Бойцов, 1985, 2011; Мониторинг..., 2002; Подземные воды..., 2003]. Распространение, происхождение и эволюция выявленных субэральных водоносных таликов в Центральной Якутии однозначно не выяснены. Недостаточно изучены гидрогеологический, геотермический и гидрохимический режимы подземных вод в них. Исследования субэральных таликов становятся особенно актуальными для оценки эволюции мерзлотно-гидрогеологических условий региона при меняющемся климате.

Впервые многолетние комплексные исследования на надмерзлотном талике в Центральной Якутии были организованы на Чабыдинском ста-

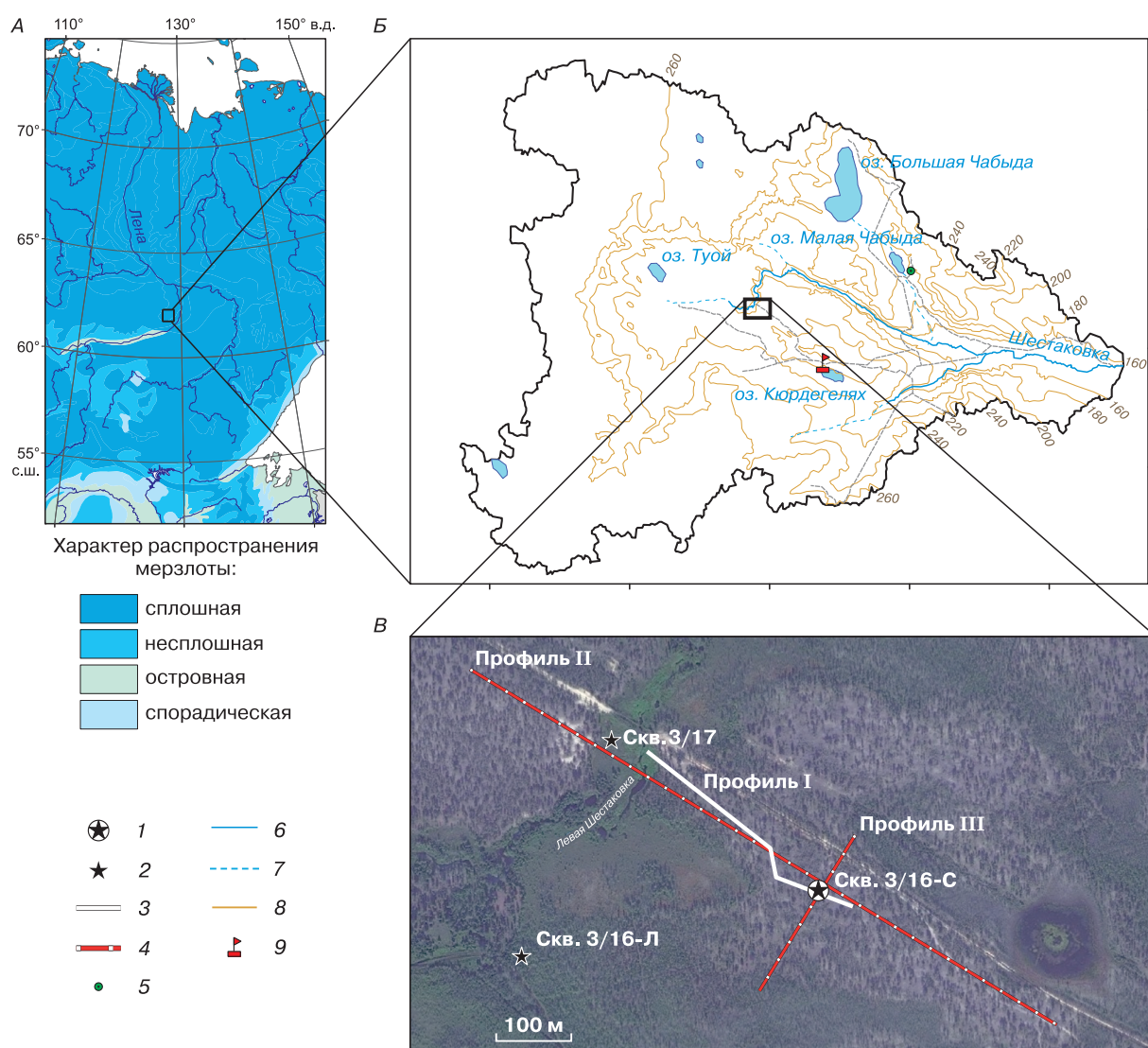


Рис. 1. Расположение и схема объекта исследования.

А – расположение объекта исследования на карте распространения мерзлоты Восточной Сибири; Б – водосбор р. Шестаковка; В – участок исследования в верховьях р. Левая Шестаковка; 1 – гидрогеологическая и термометрическая скважины; 2 – термометрическая скважина; 3 – профиль георадиолокации; 4 – профили электротомографии; 5 – Чабыдинский полигон; 6 – постоянный водоток; 7 – временный водоток; 8 – изогипсы; 9 – метеорологическая станция.

ционаре Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО АН СССР в районе оз. Малая Чабыда в бассейне р. Шестаковка. С 1977 по 1991 г. здесь проводился комплекс мерзлотно-гидрогеологических исследований, включающих уровенные, температурные, гидрохимические, ландшафтные и другие виды наблюдений [Бойцов, 1985, 2002; Скрябин и др., 1998; Варламов и др., 2002]. На территории стационара находился сосновый и лиственничный лес. Субаэральный водоносный талик грунтово-фильтрационного класса был вскрыт при бурении скважин в интервале глубин от 2.5 до 7.0 м на участке произрастания соснового леса со следами пожара. Статические запасы подземных вод Чабыдинского талика площадью 58 тыс. м² с максимальной мощностью 4 м в водно-критический период были оценены в 15 тыс. м³ [Бойцов, 1985]. Подземный сток определен А.В. Бойцовым равным 35–40 мм слоя [Мониторинг..., 2002].

В 2016 г. авторами подобный талик был обнаружен на другом участке бассейна р. Шестаковка – в 5 км от Чабыдинского стационара (рис. 1).

Цель исследования – изучить строение и температурный режим надмерзлотного водоносного талика, выявленного на надпойменной террасе р. Левая Шестаковка, а также оценить возможности методов георадиолокации и электротомографии по исследованию надмерзлотных таликовых зон.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бассейн р. Шестаковка расположен в 20 км юго-западнее г. Якутска в пределах эрозивно-денудационного склона древней аккумулятивной равнины [Мониторинг..., 2002] с абсолютными отметками 190–210 м (см. 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 1950–2015 гг. составляет –9.2 °С, января –42.6 °С, июля +18.7 °С, среднее многолетнее количество осадков 245 мм, из них на теплый период приходится 158 мм.

В распадках, понижениях и на выровненных участках в бассейне р. Шестаковка произрастают лиственнично-березовые леса (по данным собственных ландшафтных описаний). Сосновые леса занимают преимущественно склоны и водоразделы. Вдоль ручьев и озер развиты мари и заболоченные территории. Верхнюю часть геологического разреза слагают рыхлые песчаные отложения с редкими прослоями глин [Бойцов, 1985]. На склонах и водоразделах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их влажность в зоне аэрации не превышает 2–8 % (здесь и далее указывается объемная влажность). Песчаные отложения имеют кварц-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 органогенным слоем [Скрябин и др., 1998].

Мощность толщи многолетнемерзлых пород достигает 400–500 м и характеризуется нестационарным термическим режимом. На глубине 100 м температура пород составляет –0.6...–1.0 °С [Бойцов, 1985]. Температура пород на подошве слоя нулевых годовых амплитуд в зависимости от ландшафта изменяется от положительных (близких к 0 °С) значений до –2...–3 °С и ниже [Варламов и др., 2012]. Мощность сезонноталого слоя (СТС) изменяется от 4 м в сосновых лесах на пологих склонах и водоразделах до 0.5 м на марях.

А.В. Бойцовым [2002] было установлено, что устойчивое существование надмерзлотных субаэральных водоносных таликов возможно при сочетании трех факторов: 1) оголенная или слабозадернованная поверхность; 2) песчаный состав отложений; 3) слаборасчлененный рельеф. Надмерзлотные субаэральные водоносные талики имеют сложное строение в плане и часто приобретают вид отдельных желобов стока воды.

Многолетние наблюдения за температурой пород на Чабыдинском стационаре проводятся с 1977 г., режимные гидрогеологические наблюдения на участке распространения талика – с 1981 г. В 2016 г. начаты мерзлотно-гидрогеологические исследования на ключевом участке на правом берегу р. Левая Шестаковка в 5 км от Чабыдинского стационара.

Комплекс полевых работ на полигоне в верховьях р. Левая Шестаковка включал визуальное обследование территории, геофизические исследования, бурение и оборудование термометрических и гидрогеологических скважин и режимные наблюдения за температурой пород и уровнем таликовых вод.

Выбору этого участка для постановки исследований предшествовало рекогносцировочное обследование территории в апреле 2016 г. На склоне надпойменной террасы р. Левая Шестаковка была обнаружена наледь протяженностью 90 м и мощностью до 70 см. Процесс наледообразования свидетельствует о разгрузке подземных вод, источником которых может быть водоносный талик.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Бурение

После проведения рекогносцировочного обследования в сходных с Чабыдинским таликом ландшафтных условиях были пробурены две скважины. Скважина 3/16-С глубиной 10 м расположена в сосновом лесу в 300 м от бровки надпойменной террасы р. Левая Шестаковка. Скважина 3/16-Л глубиной 3 м пробурена в лиственничном лесу в 125 м от русла реки выше по течению. Рас-

стояние между скважинами 410 м. Абсолютная отметка устья скважин около 210 м над ур. моря. Бурение выполнялось колонковым способом с помощью самоходной буровой установки УРБ-2А2. Обе скважины были обсажены и оборудованы датчиками для термометрических наблюдений. Скважина 3/16-С спарена с гидрогеологической, в которой установлен фильтр в интервале водоносного талика.

В апреле 2017 г. была пробурена скв. 3/17 глубиной 20 м на высокой левобережной пойме р. Левая Шестаковка в 30 м от русла (абс. отметка устья около 200 м над ур. моря). Скважина была оборудована датчиками для термометрических наблюдений.

Гранулометрический состав отложений из скважин 3/16-С и 3/16-Л определялся в поле, из скв. 3/17 – ареометрическим и ситовым методами в лабораторных условиях. Бурение всех скважин производилось с отбором керна для определения влажности пород термостатно-весовым методом.

Термометрический мониторинг

Для изучения температурного режима пород использовались термисторные датчики с логгером Onset HOBO U12 (скв. 3/16-С, 3/16-Л) и Maxim Integrated DL18B20 (скв. 3/17). Точность измерения температуры термисторами Onset составляет ± 0.25 °С в диапазоне температур 0–50 °С и ± 0.5 °С при –20 °С. П.Я. Константинов с соавт. [2011] показали, что, как правило, ошибка термисторов не выходит за пределы ± 0.1 °С. Датчики температур были установлены на глубинах 0.5, 1, 3 и 6 м в скв. 3/16-С и 0.5, 1, 2 и 3 м в скв. 3/16-Л, интервал записи 3 ч. Скважина 3/17 была оборудована термокосой с 26 калиброванными датчиками температуры, расположенными до глубины 5 м с шагом 0.5 м, от 5 до 20 м – через 1 м. Точность измерения температуры термисторами DL18B20 составляет ± 0.5 °С в диапазоне температур –10...+85 °С. Был выполнен один замер температуры 27 апреля 2017 г. через три недели после бурения.

Температура и влажность воздуха, количество жидких осадков, скорость ветра и атмосферное давление регистрировались каждый час автоматической метеостанцией HOBO Microstation, установленной в 2.5 км от скважин (см. рис. 1). Точность определения температуры ± 0.2 °С в диапазоне температур 0–50 °С, ± 0.5 °С при –20 °С и ± 1.1 °С при –40 °С.

Геофизические методы

Геофизические работы были проведены на ключевом участке в верховьях р. Левая Шестаковка методами георадиолокации и электротомографии. Наличие гидрогеологических скважин позволило уточнить значение диэлектрической проницаемости изучаемой среды для более точной

обработки геофизических материалов. Геофизическое комплексирование этими методами хорошо зарекомендовало себя при геокриологических исследованиях в районах распространения многолетнемерзлых пород [Оленченко, Шейн, 2012; Оленченко и др., 2017; You et al., 2017].

Георадиолокационные работы выполнены георадаром ОКО-2 (ООО “ЛогиС”, Россия) с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц). Съемка производилась по профилю по направлению СЗ–ЮВ на расстояние около 300 м (см. рис. 1, профиль I) в апреле, в период максимального промерзания пород. Для исследования участка применены параметры сканирования: развертка 200 нс; диэлектрическая проницаемость 6; непрерывный режим записи. Измерения проведены в плотном контакте с поверхностью изучаемой среды. Для обработки и интерпретации полевых данных использовалось программное обеспечение GeoScan32 (ООО “ЛогиС”, Россия).

Для определения удельного электрического сопротивления (УЭС) пород использовалась многоканальная многоэлектродная станция “Скала-64” производства КБ Электрометрии (Новосибирск). Станция имеет 64 электрода и 16 измерительных каналов. Обработка полученных данных проводилась в программе ZonRes2D [Электроразведка..., 2013]. Измерения выполнены по профилям II и III (см. рис. 1). Профиль II был пройден 18 августа 2016 г. перпендикулярно р. Левая Шестаковка по направлению СЗ–ЮВ и имел длину 955 м с шагом 5 м. Профиль III длиной 255 м был выполнен с шагом 1 м 8 июля 2016 г. параллельно р. Шестаковка в 300 м от берега по направлению СВ–ЮЗ (см. рис. 1). Для проведения измерений использовались протоколы, составленные для диполь-дипольной установки и 4-электродной установки Шлюмберже. Согласно СП-11-105-97-VI [2004] (приложение Ж), значение удельного сопротивления, разделяющее талые и мерзлые пески, находится в пределах 1000–2500 Ом·м. Талые сухие пески характеризуются близкими значениями сопротивления. Талые водонасыщенные пески при минерализации воды 0.1–0.3 г/дм³ имеют сопротивление 100 Ом·м и ниже. При сопоставлении данных бурения и электротомографии авторами было принято, что водонасыщенные пески обладают удельным сопротивлением до 2000 Ом·м (рис. 2). Относительно высокие значения УЭС связаны с пониженной минерализацией подземных вод талика (равной 0.02–0.04 г/дм³) и наличием высокоомного экранирующего горизонта с поверхности за счет сухих песков. Породы с удельным сопротивлением более 2000 Ом·м считались мерзлыми. Породы с УЭС около 2000 Ом·м в верхней части разреза интерпретировались как талые и сухие пески на момент выполнения работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты бурения

Литологические колонки, влажность по трем пробуренным скважинам, а также значения УЭС по двум из них представлены на рис. 2. По данным бурения скв. 3/16-С выявлен разреженный напочвенный покров, который представляет собой опад сосновой хвои и отдельные заросли толокнянки. По всему разрезу вскрыты желтовато-серые среднезернистые пески с признаками ожелезнения и редкими включениями органики. В интервалах глубин с поверхности до 1.7 м и от 7.2 до 10 м пески находятся в мерзлом состоянии. С глубины 1.7 до 7.2 м вскрыт водонасыщенный талик. Суммарная льдистость песков сезонномерзлого слоя (СМС) составляет от 2 до 4 %. Полная влагоемкость песчаных отложений в талике превышает 30 %. Льдистость подстилающих мерзлых отложе-

ний равна 33–35 %. На участке бурения скважины 3/16-Л напочвенный покров сомкнутый (мощность 5–10 см) и представлен мхами, лишайниками и кустарничками. Скважиной до глубины 3.7 м пройдены мерзлые песчаные отложения среднезернистого состава с остатками органики. Льдистость пород варьируется от 26 до 36 %.

Скважиной 3/17 вскрыты оторфованные отложения с поверхности до глубины 0.4 м, мелко- и среднезернистые пески в интервале глубин 0.4–5.4 м, пылеватая супесь на глубинах 5.4–7.6 м, песок мелкозернистый в интервале 7.6–15.8 м и переслаивание супеси, суглинка и песка на глубинах 15.8–20 м. По всему разрезу породы находятся в мерзлом состоянии. Их льдистость варьируется от 14 до 35 %. Максимальная льдистость 42 % приурочена к оторфованным отложениям в верхней части разреза.

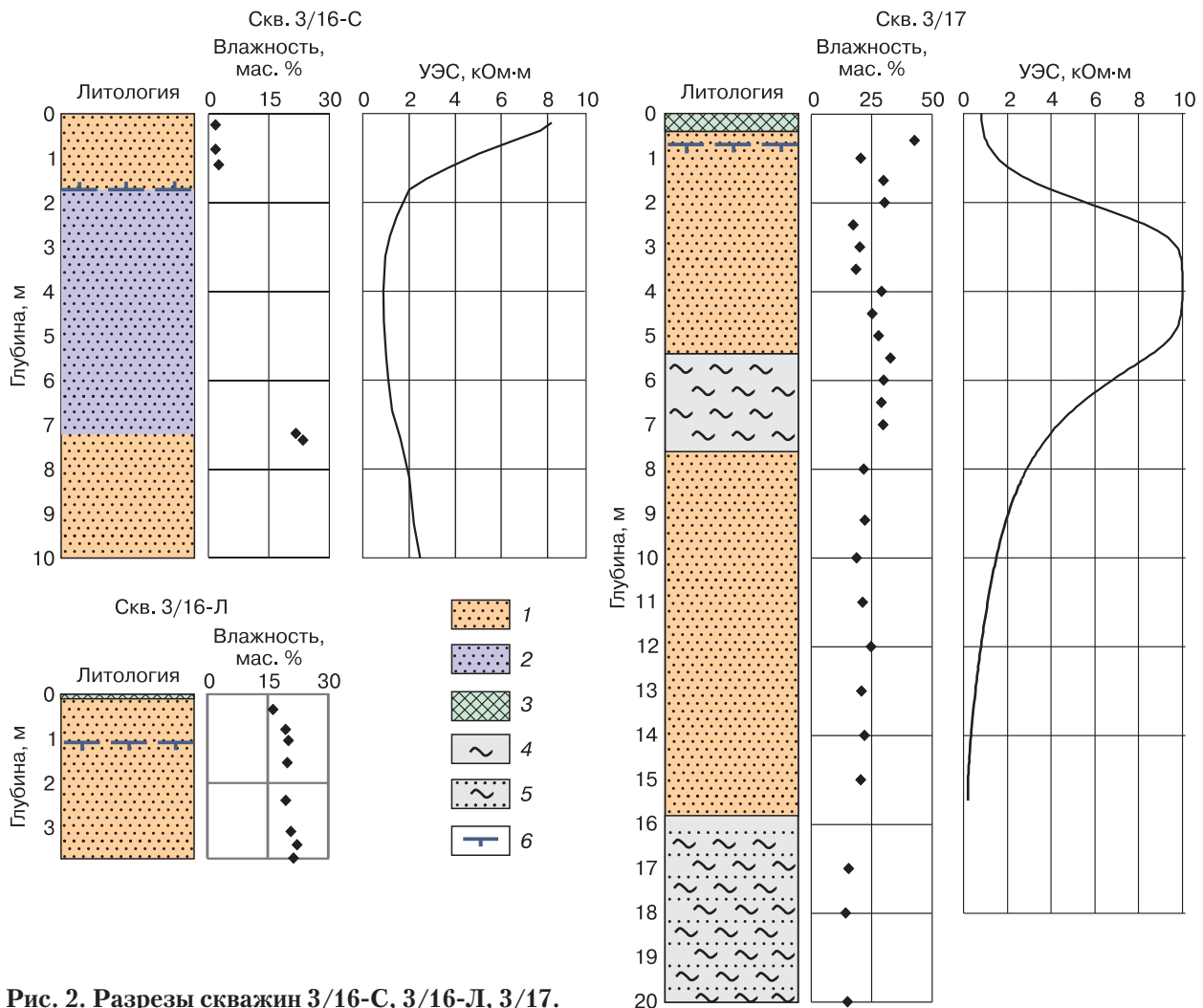


Рис. 2. Разрезы скважин 3/16-С, 3/16-Л, 3/17.

1 – мелко- и среднезернистый мерзлый песок; 2 – мелко- и среднезернистый талый водонасыщенный песок; 3 – органический горизонт; 4 – мерзлая пылеватая супесь; 5 – переслаивание мерзлых супеси, суглинка и песка; 6 – нижняя граница СТС/СМС.

Температурный режим пород

Годовой цикл термометрических наблюдений, выполненных на участке распространения соснового леса в скв. 3/16-С за период с 01.05.2016 г. по 30.04.2017 г. подтвердил существование талика в диапазоне глубин 3–6 м. Средняя температура пород за период измерений отрицательна только на глубине 0.5 м ($-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), а на глубинах 1, 3 и 6 м она составляет 0, 0.3 и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Мощность слоя сезонного промерзания пород по результатам бурения составила 1.7 м (рис. 3).

Переход среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сторону положительных значений произошел 17 апреля, после чего снег интенсивно таял. Протаивание пород сверху началось в конце апреля. Максимальная среднесуточная температура пород на глубинах 0.5 и 1 м была 14.0 и $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 июля и 3 августа соответственно (см. рис. 3). До 18 августа температура на глубине 3 м была равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В дальнейшем на этой глубине до 6 октября температура пород повышалась до $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переход среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в

сторону отрицательных значений был зафиксирован 25 сентября. В первых числах октября начал формироваться сезонномерзлый слой. Минимальная температура пород на глубинах 0.5 и 1 м составила -13.5 и $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно 11 и 29 декабря. Температура на глубинах 3 и 6 м в течение всего холодного сезона держалась около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Амплитуда колебаний температуры пород в зоне аэрации на глубине 0.5 м превышала $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 1 м – около $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. В верхней части водоносного горизонта (глубина 3 м от дневной поверхности) амплитуда колебаний температур в течение года равна $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ при среднем значении $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а его нижняя часть (6 м) имела постоянную температуру, близкую к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На участке распространения лиственничного леса, по данным измерений в скв. 3/16-Л, средняя годовая температура пород по всему разрезу была отрицательна и изменялась от -2.6 до $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубинах от 0.5 до 3.0 м. Скорость протаивания пород здесь была значительно ниже. Изотерма $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигла глубины 0.5 м 4 июля. Максимальная температура на этой глубине равна $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на

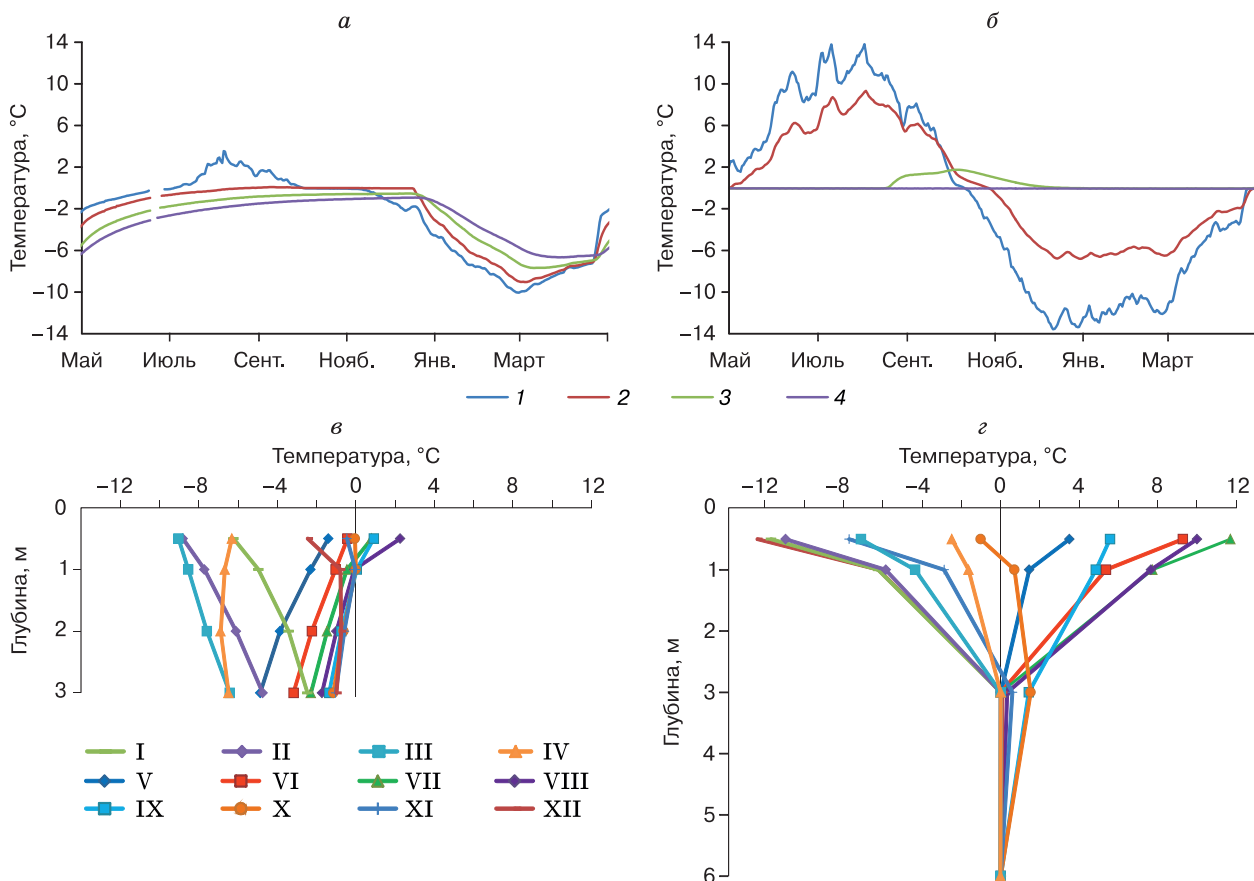


Рис. 3. Временной ход температуры пород на различных глубинах (а, б) и кривые температуры за май 2016 г.–апрель 2017 г. (в, з).

а, в – скважина 3/16-Л; б, з – скважина 3/16-С. Глубины: 1 – 0.5 м, 2 – 1.0 м, 3 – 2.0 м, 4 – 3.0 м (скв. 3/16-Л) и 6.0 м (скв. 3/16-С); I–XII – номер месяца.

блюдалась 7 августа. В 1 м от поверхности земли температура пород превысила $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 26 августа и 9–10 сентября достигла максимального значения $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальные температуры пород на глубинах 0.5 и 1.0 м наблюдались 26 февраля и 5 марта 2017 г. и были -10.1 и $-9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Температура пород на глубинах 2 и 3 м оставалась отрицательной в течение всего периода измерений, достигая максимальных значений -0.6 и $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальных значений -7.7 и $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно (см. рис. 3). Амплитуда колебаний температуры пород в течение года закономерно уменьшалась от $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 0.5 м до $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 3 м. Глубина СТС составила чуть более 1 м.

При одном и том же метеорологическом фоне и сходном гранулометрическом составе отложений средняя температура пород за год измерений в сосновом лесу была выше, чем в лиственном. Разница увеличивалась с $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 0.5 м до $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 3 м. Максимальные температуры пород на глубине 0.5 м в лиственном лесу были на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем в сосновом. На глубине 1 м разница составляла более $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для зоны аэрации в сосновом лесу характерна большая внутригодовая изменчивость температуры пород, чем для верхней толщи отложений в лиственном лесу. Разница амплитуд годовых колебаний температур отложений в сосновом и лиственном лесу на глубине 0.5 м составляла $13.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на глубине 1 м равна $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным С.П. Варламова с соавт. [2017], полученным на Чабьдинском стационаре ИМЗ СО РАН, температура пород слоя годовых теплооборотов (10–20 м) в сосняках при отсутствии талика была выше, чем в лиственничниках, на $0.2\text{--}2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. По полученным авторами данным, водонасыщенные породы с постоянной температурой около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение всего года приводили к малой (менее 6 м) мощности слоя годовых теплооборотов на участке распространения надмерзлотных субаэральных таликов.

Характер связи ежедневных температур пород с температурой воздуха в двух рассматриваемых ландшафтах существенно различается. В таблице приведены максимальные коэффициенты корреляции (КК) температур отложений на разных глубинах с температурой воздуха, для которой зафиксирована временная сдвигка. Темпера-

Максимальные коэффициенты корреляции (КК) температуры пород в лиственном и сосновом лесу с температурой воздуха (с временной сдвижкой)

Глубина, м (листв./ сосн.)	Максимальный КК		Временная сдвигка, сут	
	Листв. лес	Сосн. лес	Листв. лес	Сосн. лес
0.5	0.95	0.96	53	5
1.0	0.92	0.94	67	16
2.0/3.0	0.95	0.67	92	86
3.0/6.0	0.97	–	102	–

тура пород на глубине 0.5 м в сосновом лесу имеет максимальный КК (равный 0.96) с температурой воздуха, наблюдавшейся пять дней назад. Температура пород в лиственном лесу характеризуется максимальным КК (равным 0.95) с температурой воздуха, наблюдавшейся 53 дня назад. Температура отложений на глубине 1 м в сосновом лесу имеет максимальный КК (равный 0.94) с температурой воздуха, наблюдавшейся 16 дней назад, а в лиственном лесу – максимальный КК (равный 0.92) с температурой воздуха, наблюдавшейся 67 дней назад. Температура пород в сосновом лесу на больших глубинах характеризуется меньшим КК с температурой воздуха, а в лиственном лесу значение КК остается высоким до глубины 3 м. Температура водонасыщенных отложений у подошвы талика в сосновом лесу на глубине 6 м близка к нулевым значениям в течение всего года и не имеет связи с температурой воздуха. Температура пород в зоне аэрации водоносного талика имеет прямую тесную связь с температурой воздуха, тогда как в мерзлых породах в лиственном лесу требуется почти два месяца, чтобы температурные колебания воздуха проникли до глубины 0.5 м, и около трех месяцев – до глубины 2 м. Основными причинами разного распределения температур пород в сосновых и лиственничных лесах являются контрастный влажностный режим отложений и наличие мощного напочвенного покрова в лиственничнике.

В долине р. Левая Шестаковка на участке скв. 3/17 в конце апреля температура пород понижалась с $-4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 0.5 м до $-11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 3.5 м и затем повышалась до $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубине 20 м. На поверхности наблюдалась температура $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Уровень и химический состав подземных вод

Процессы промерзания–протаивания отразились в гидродинамическом режиме подземных вод талика. Ход уровня воды в скв. 3/16-С и осадков за теплый сезон 2016 г. приведен на рис. 4. Уровень воды устанавливался наиболее близко (1 м) к поверхности земли в апреле. Криогенный напор в это время составил 0.7 м. Абсолютная отметка

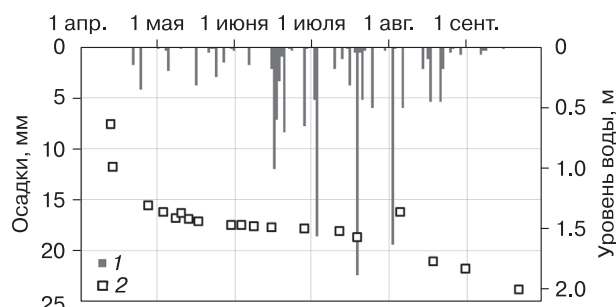


Рис. 4. Динамика осадков (1) и уровня воды в скважине 3/16-С (2) в теплый сезон 2016 г.

земной поверхности около скв. 3/16-С примерно на 5 м выше отметки бровки террасы р. Шестаковка, где обнаружена наледь. По наблюдениям 2016 г., уровень таликовых вод находился выше бровки. Согласно визуальным наблюдениям 2017–2018 гг., наледь начинала формироваться и интенсивно росла в декабре. В это время подземные воды выходили на поверхность земли, насыщали снежный покров и замерзали. К началу февраля формирование наледи завершалось. В теплый период 2016 г. в процессе протаивания СМС уровень грунтовых вод понизился и в конце сентября установился на глубине 2 м. Минерализация воды в талике на протяжении 2016 г. изменялась от 24 до 36 мг/дм³. Варьирование ее связано главным образом с изменением содержания гидрокарбонатов кальция и магния, концентрации которых зависят от наличия углекислоты. Максимальные значения минерализации фиксировались в июне и июле, когда отмечалось интенсивное протаивание СМС, но над таликом еще сохранялся слой промерзших за зиму пород.

Геофизические исследования

Георадиолокационные исследования показали, что в апреле 2016 г. наблюдались как минимум две предположительно разобщенные талые зоны (рис. 5, А). Одна из них прослеживалась у бровки террасы р. Шестаковка и имела длину 50 м. Вторая таликовая зона зафиксирована на выположенной приводораздельной части в 160 м от бровки террасы и имела протяженность около 170 м. Кровля выявленных таликов достаточно ровная, глубина ее залегания совпадала с мощностью слоя сезонного протаивания (промерзания) 2–4 м. Мощность таликов от 8 м на водоразделе уменьшалась до 3 м по направлению к долине р. Левая Шестаковка.

Согласно геоэлектрическому разрезу по профилю II (см. рис. 5, Б, В) верхний слой сухих песчаных отложений мощностью около 2 м соответствует СТС и СМС. Удельное сопротивление пород до этой глубины составляет 2000–10 000 Ом·м. Под СТС на левом берегу р. Левая Шестаковка залегают мерзлые песчаные отложения. Области пониженного сопротивления на глубине 10 м авторы относят к изменению литологического состава мерзлых пород. На правом берегу реки от бровки надпойменной террасы до конца профиля выделяется талик с УЭС менее 2000 Ом·м, общей протяженностью около 650 м. Мощность талика варьируется от 3 до 7 м. На момент выполнения геофизических исследований СМС над таликом полностью протаял. В верхней части пологого правого склона в 400–630 м от бровки террасы СМС характеризуется низкой влажностью и удельными сопротивлениями 2000–10 000 Ом·м соответственно. Талик подстилается мерзлыми породами с УЭС от 2000 до 10 000 Ом·м. Выделенные на раз-

резе области с удельным сопротивлением менее 1000 Ом·м предположительно соответствуют зонам интенсивной фильтрации воды и ожелезнения песков. Под руслом р. Левая Шестаковка, в которой глубина воды составила около 1 м на момент выполнения электротомографии, мощность слоя сезонного протаивания была равна 2.5 м.

На геоэлектрическом разрезе по профилю III (см. рис. 5, Г, Д) прослеживается талик в интервале глубин 2–10 м. Талик разобщен на несколько фрагментов обводненных пород, ориентированных в направлении СЗ–ЮВ вниз по склону, с максимальными мощностями 5.8–6.5 м. Ранее А.В. Бойцовым на Чабыдинском стационаре ИМЗ СО РАН было выявлено наличие подобных талых желобов, по которым происходит фильтрация надмерзлотных вод [Мониторинг..., 2002].

Конфигурация талых зон, полученная разными геофизическими методами на близкорасположенных профилях, сходна и согласуется с имеющейся информацией по свойствам геологического разреза по скв. 3/16-С. По всем разрезам мощность талика у скважины составляет около 7 м. Некоторые различия объясняются разной разрешающей способностью метода электротомографии при разном шаге между электродами, а также выполнением работ в различные периоды года. Хорошее согласие данных подтверждает перспективу использования геофизических исследований для поиска таликов.

Надмерзлотные талики приурочены к пологому слабозадержанному склону, покрытому редким сосновым лесом. Ширина зоны распространения талых желобов составляет 180–200 м, протяженность вдоль склона – около 500 м. В зимний период, по-видимому, породы частично перемерзают и движение поровой воды происходит по разобщенным зонам, которые видны по результатам георадиолокации на профиле I (см. рис. 5, А).

Генезис таликов

По результатам оконтуривания талых зон с помощью геофизических работ выявлено, что надмерзлотные воды субаэрального талика на правом берегу р. Левая Шестаковка в летний период имеют связь с руслом реки. Зимой при промерзании пород с поверхности надмерзлотные грунтовые воды приобретают криогенный напор. В декабре и январе на склоне речной террасы формируется наледь, которая полностью стает к концу мая.

Результаты электротомографии, выполненной на обоих берегах реки, показали, что талик присутствует на склоне северо-западной экспозиции и отсутствует на склоне юго-восточной экспозиции. Это говорит о второстепенном влиянии экспозиции склона на формирование надмерзлотных субаэральных таликов в условиях Центральной Якутии.

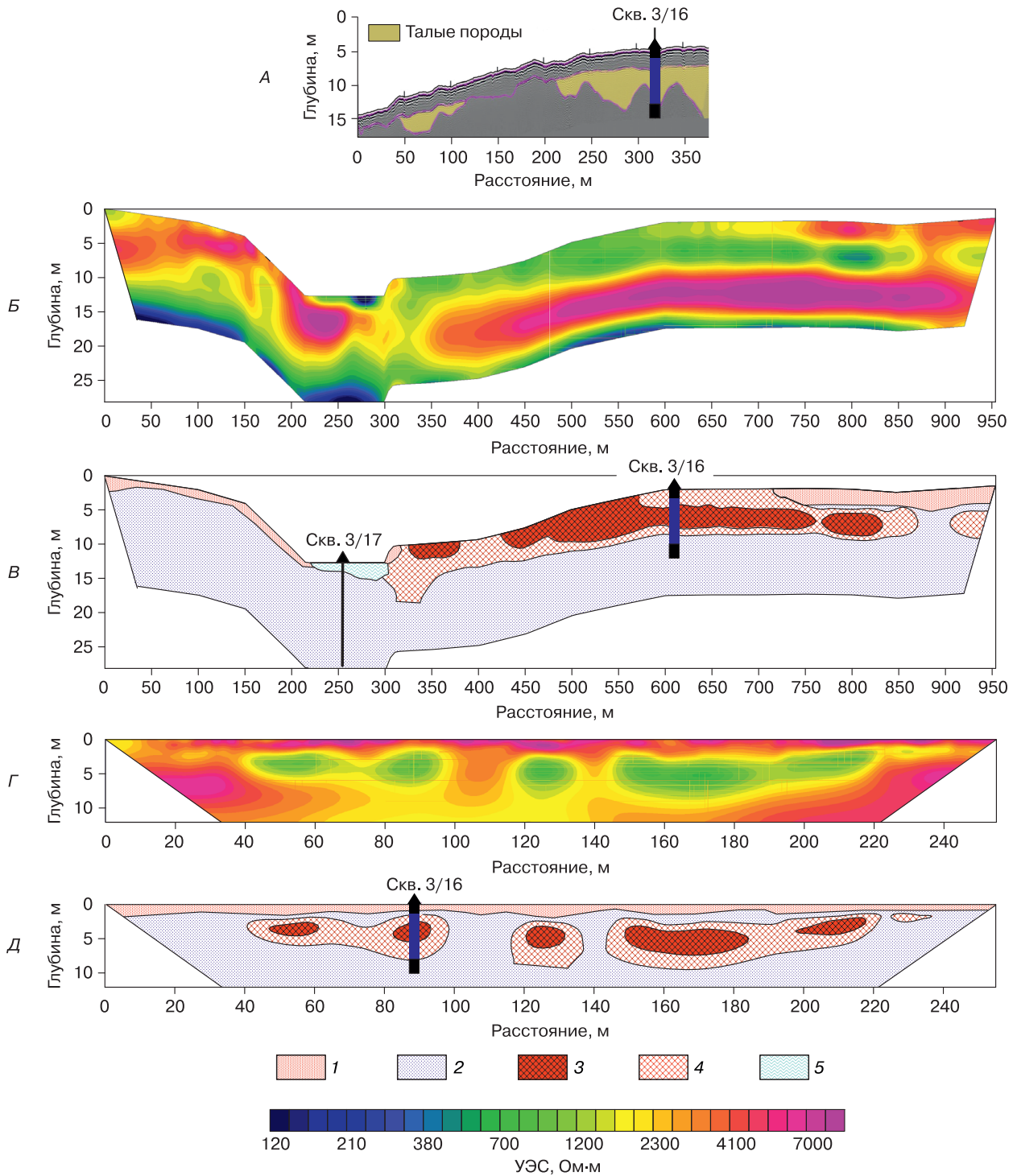


Рис. 5. Георадиолокационный разрез по профилю I (A), геоэлектрический (B) и мерзотно-геофизический (B) разрез по профилю II, геоэлектрический (Г) и мерзотно-геофизический (Д) разрез по профилю III.

Профили I и II проходили близко друг к другу и совмещены по оси абсцисс. 1 – СТС/СМС (УЭС 2000–9000 Ом·м); 2 – мерзлые породы (УЭС 2500–10000 Ом·м); 3 – талые породы (УЭС <1000 Ом·м); 4 – талые породы (1000 Ом·м < УЭС < 2000 Ом·м); 5 – СТС под руслом реки (УЭС 50–100 Ом·м).

Существует несколько гипотез формирования таликов в сплошной криолитозоне Центральной Якутии. Согласно одной из них, инфильтрующиеся в хорошо проницаемые песчаные грунты летние осадки приносят дополнительное тепло, за счет которого формируется талик. По другой гипотезе, устойчивое превышение летней влажности грунтов над зимней приводит к увеличению теплопроводности пород и более интенсивному их прогреванию в летний период по сравнению с охлаждением зимой [Бойцов, Лебедева, 1989; Шепелев и др., 1996]. Источником дополнительного тепла могут служить процессы конденсации водяных паров в песчаных отложениях [Шепелев, 1980]. В 2013–2014 гг. Л.А. Гагариным [2015] был зафиксирован перезимок в песчаных породах правобережья р. Лены, который сформировался в течение нескольких влажных и многоснежных лет подряд, что говорит о возможной преобладающей роли метеорологических и климатических факторов в формировании талых зон. А.В. Бойцов [2015] отмечает, что в настоящее время происходит промерзание Чабыдинского талика, вызванное восстановлением растительности, уничтоженной пожаром в начале 1960-х гг.

Собранные в ходе исследования данные не позволяют сделать однозначный вывод о генезисе исследуемого талика. Необходимы режимные наблюдения за температурой пород и уровнем подземных вод, охватывающие современный период повышения температуры воздуха, чтобы судить о возможных причинах формирования и эволюции таликов в Центральной Якутии.

ВЫВОДЫ

Ландшафты лиственничных и сосновых лесов в бассейне р. Шестаковка в Центральной Якутии характеризуются контрастными мерзлотно-гидрогеологическими условиями. Средняя температура пород за год измерений в сосновом лесу выше, чем в лиственничном, на 1.5 °С на глубине 0.5 м и на 3.3 °С на глубине 3 м. На участке развития редкого соснового леса выявлено существование надмерзлотного грунтово-фильтрационного водоносного талика радиационно-теплого типа. Температура водонасыщенных пород у подошвы талика близка к нулевым значениям в течение всего года. Температура пород в зоне аэрации имеет тесную связь с температурой воздуха. В мерзлых породах в лиственничном лесу требуется два месяца, чтобы температурные колебания воздуха проникли до глубины 0.5 м, и три месяца – до глубины 2 м. По результатам геофизических исследований выявлено, что талик разобщен на несколько водопроницающих талых желобов, ориентированных вдоль пологого склона надпойменной террасы долины р. Левая Шестаковка. Ширина таликовой зоны составляет 180–200 м, протяженность – более 500 м.

Конфигурация талых зон, полученная по данным электротомографии и георадиолокации на близкорасположенных профилях в разное время года, сходна и согласуется с информацией, полученной при бурении. Это подтверждает перспективу использования геофизических исследований для поиска таликов. Для понимания механизмов формирования таликов в Центральной Якутии необходимы продолжительные режимные наблюдения за температурой пород и уровнем подземных вод в условиях современного повышения температуры воздуха, а также дальнейшие исследования геометрии талых зон и ее временной изменчивости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00926, 17-05-01287, 18-05-60036, 16-35-60082 мол_а_дк).

Литература

- Бойцов А.В.** Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, с. 44–55.
Boitsov, A.V., 1985. Conditions of formation and the regime of slope taliks in Central Yakutia, in: Hydrogeological Studies. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, pp. 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.
Boitsov, A.V., 2002. The Conditions of Formation and the Regime of Ground Waters of Supra-permafrost and Intra-permafrost Runoff in Central Yakutia, candidate thesis (geology). Yakutsk, 176 pp. (in Russian)
- Бойцов А.В.** Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень, Изд-во ТюмГНГУ, 2011, 177 с.
Boitsov, A.V., 2011. Geocryology and the Ground Waters of the Permafrost Zone. Tyumen State University Press, Tyumen, 177 pp. (in Russian)
- Бойцов А.В.** Гидродинамика таликов и инъекционное льдообразование // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (Якутск, 22–28 июня 2015 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2015, с. 66–69.
Boitsov, A.V., 2015. Hydrodynamics of taliks and injection ice formation, in: Fundamental and Applied Issues of Hydrogeology. Proceedings of the All-Russia Meeting on Ground Waters of the East of Russia (Yakutsk, June 22–28, 2015). Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, pp. 66–69.
- Бойцов А.В., Лебедева Т.Н.** Водный режим песчаных грунтов слоя сезонного протаивания в Центральной Якутии // Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. М., Наука, 1989, с. 27–38.
Boitsov, A.V., Lebedeva, T.N., 1989. The aquatic regime of the sand grounds of the active layer in Central Yakutia, in: Hydrogeological Permafrost Studies of the Free Water Exchange Zone. Nauka, Moscow, pp. 27–38.
- Бойцов А.В., Шепелев В.В.** Мерзлотно-гидрогеологические условия массива развееваемых песков Махатта (Центральная Якутия) // Гидрогеологические исследования криолитозоны. Якутск, 1976, с. 25–34.
Boitsov, A.V., Shepelev, V.V., 1976. The permafrost-hydrogeological conditions of the Makhatta massif of quick sands (Central Yakutia), in: Hydrogeological Studies of the Permafrost Zone. Yakutsk, pp. 25–34.

Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002, 218 с.

Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N., 2002. The temperature regime of the grounds of the permafrost landscapes in Central Yakutia. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 218 pp. (in Russian)

Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии // Тр. 10-й Междунар. конф. по мерзлотоведению TICOP: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире (Салехард, 25–29 июня 2012 г.). Салехард, 2012, т. 3, с. 47–52.

Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N., Shender, N.I., 2012. The thermal condition of the upper horizons of the permafrost zone of Central Yakutia, in: Proc. of the 10th International Conference on Permafrost TICOP: the resources and risks of the permafrost regions in the changing world (Salekhard, June 25–29, 2012). Salekhard, vol. 3, pp. 47–52.

Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на станции «Чабыда» (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2017, № 2 (86), с. 34–40.

Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N., 2017. The results of 35-years' monitoring of the permafrost zone at the Chabyda monitoring station (Central Yakutia). Prirodnye Resursy Arktiki i Subarkтики, 2 (86), 34–40.

Гагарин Л.А. Оценка современных условий формирования субаэриальных таликов в Центральной Якутии // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (Якутск, 22–28 июня 2015 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2015, с. 76–80.

Gagarin, L.A., 2015. Evaluation of the modern conditions of formation of sur-aerial taliks in Central Yakutia, in: Fundamental and Applied Issues of Hydrogeology. Proceedings of the All-Russia Meeting on Ground Waters of the East of Russia (Yakutsk, June 22–28, 2015). Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, pp. 76–80.

Катасонова Е.Г., Толстов А.Н. Геокриологические особенности развееваемых песков (тукуланов) правобережья р. Вилюй // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 166–179.

Katasonova, E.G., Tolstov, A.N., 1963. The geocryological features of quick sands (tukulans) on the right bank of the Viluy River, in: Permafrost Mountain Rocks in Different Regions of the USSR. AS USSR Press, Moscow, pp. 166–179.

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

Konstantinov, P.Ya., Fedorov, A.N., Michimura, T., et al., 2011. Use of automated recorders (data loggers) in permafrost temperature monitoring. Earth's Cryosphere XV (1), 23–32.

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

Shepelev, V.V., Boitsov, A.V., Oberman, N.G. (Eds.), 2002. Monitoring of the Ground Waters of the Permafrost Zone. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 172 pp. (in Russian)

Оленченко В.В. Геокриологическое строение пойменных и надпойменных отложений р. Юрибей (Ямал) по данным электрических зондирований / В.В. Оленченко, А.Н. Шейн. Новосибирск, Интерэкспогео-Сибирь, 2012, с. 33–37.

Olenchenko, V.V., Shein, A.N., 2012. The geocryological structure of the flood plain and supra-flood plain deposits of the

Yuribei River (Yamal Peninsula) according to electrical resistivity data. Interexpogeo-Sibir, pp. 33–37.

Оленченко В.В., Гагарин Л.А., Христофоров И.И. и др. Строение участка развития термосуффозионных процессов в пределах бестяхской террасы реки Лены по геофизическим данным // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 5, с. 16–26.

Olenchenko, V.V., Gagarin, L.A., Khristoforov, I.I., Kolesnikov, A.V., Efremov, V.S., 2017. The structure of a site with thermo-suffosion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. Earth's Cryosphere XXI (5), 14–23.

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

Anisimova, N.P. (Ed.), 2003. The Ground Waters of Central Yakutia and the Perspectives of their Use. SB RAS Press, Geo affiliate, 117 pp. (in Russian)

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны / Под ред. В.А. Всеволожского. М., МГУ, 1983, 232 с.

Romanovsky, N.N., 1983. The Ground Waters of the Permafrost Zone. Vsevolozhsky, V.V. (Ed.). Moscow University Press, Moscow, 232 pp. (in Russian)

Скрыбин П.Н. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска / П.Н. Скрыбин, С.П. Варламов, Ю.Б. Скачков. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 144 с.

Skryabin, P.N., Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., 1998. Annual Variability of the Thermal Regime of Grounds in a District of Yakutsk. SB RAS Press, Novosibirsk, 144 pp. (in Russian)

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М., Госстрой РФ, 2004, 58 с.

Construction Regulations CR (SP) 11-105-97, 2004. Pre-construction Engineering and Geological Survey, part VI. Regulations for Conducting Geophysical Survey. RF Gosstroy, Moscow, 58 pp. (in Russian)

Шендер Н.И., Бойцов А.В., Тетельбаум А.С. Формирование таликов и высокотемпературных мерзлых пород в условиях Центральной Якутии // Материалы первой конф. геокриологов России. М., Изд-во МГУ, 1996, кн. 1, с. 529–537.

Shender, N.I., Boitsov, A.V., Tetelbaum, A.S., 1996. Formation of taliks and high-temperature permafrost rocks under conditions of Central Yakutia, in: Proceedings of the First Conference of Geocryologists of Russia. Moscow University Press, Moscow, vol. 1, pp. 529–537.

Шепелев В.В. Роль процессов конденсации в питании подземных вод мерзлой зоны // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод мерзлой зоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1980, с. 43–56.

Shepelev, V.V., 1980. The role of condensation processes in the recharge of the ground waters of the permafrost zone, in: Interaction between the Surface and Grounds Waters of the Permafrost Zone. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, pp. 43–56.

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. II. Малоглубинная электроразведка / Под ред. В.А. Шевнина, А.А. Бобачева. М., МГУ, 2013, 123 с.

Shevnin, V.A., Bovachev, A.A. (Eds.), 2013. Electrical Resistance Survey: a Manual on Electrical Resistance Training for Students of Geophysics. Vol. 2, Deep Electrical Resistance Survey. Moscow University Press, Moscow, 123 pp. (in Russian)

You, Y., Yu, Q., Pan, X., Wang, X., Guo, L., Wu, Q. Thermal effects of lateral supra-permafrost water flow around a thermokarst lake on the Qinghai-Tibet Plateau // Hydrological Processes, 2017, vol. 31, p. 2429–2437, DOI: 10.1002/hyp.11193.

Поступила в редакцию 24 июля 2017 г., после доработки – 11 сентября 2018 г., принята к публикации 19 октября 2018 г.