

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.37; 551.34; 556.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(61-68)

**ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМОСУФФОЗИОННОГО РАЗУПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ
ВДОЛЬ ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГИ А-360 “ЛЕНА” В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ****Л.А. Гагарин^{1,2}, К.И. Бажин¹, В.В. Оленченко³, В.В. Огонеров¹, Ву Цинбай²**¹Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; gagarinla@gmail.com²Северо-западный институт окружающей среды и ресурсов Китайской АН, Государственная ключевая лаборатория
инженерии мерзлых почв, 730000, Ланьчжоу, Ганьсу, В. Донганг Роуд, 326, КНР³Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

Приводятся результаты исследований термосуффозионных процессов с 2008 по 2017 г. По данным электрического зондирования методом электротомографии определена высокая динамичность мерзлотно-гидрогеологической обстановки в районе источника подземных вод Улахан-Тарын в Центральной Якутии. Установлено, что под действием тепла межмерзлотных подземных вод мощность перекрывающих их многолетнемерзлых пород сократилась на 4 м за четыре года. В районе федеральной автомобильной дороги А-360 “Лена” выявлено пять участков потенциального термосуффозионного разуплотнения горных пород и вероятных мест образования просадок дневной поверхности.

Термосуффозия, межмерзлотные воды, надмерзлотные воды, талик, многолетнемерзлые породы, электротомография

**REVEALING POTENTIAL THERMO-SUFFUSIONAL SOIL LOOSENING SITES ALONG A-360 LENA
FEDERAL HIGHWAY, CENTRAL YAKUTIA****L.A. Gagarin^{1,2}, K.I. Bazhin¹, V.V. Olenchenko³, V.V. Ogonerov¹, Wu Qingbai²**¹Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; gagarinla@gmail.com²Institute of Eco-Environment and Resources, CAS,

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Northwest, 326, W. Donggang rd., Lanzhou, 730000, China

³Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 3, Acad. Koptuga ave., Novosibirsk, 630090, Russia

The article presents results of the studies of thermo-suffusion process development in the period from 2008 through 2017. Electrical sounding by electrical resistivity tomography revealed highly dynamic geocryological and hydrogeological conditions at the Ulakhan-Taryn groundwater spring site, Central Yakutia. It has been established that the permafrost thickness degraded by 4 m in a 4-year period above the intra-permafrost ground water due to heat effects. Five sites of thermal-suffusional soil loosening and potential surface subsidence were identified along the Lena Highway.

Thermo-suffusion, intrapermafrost water, suprapermafrost water, talik, permafrost, electrical resistivity tomography

ВВЕДЕНИЕ

Метод электротомографии успешно применяется для изучения мерзлотно-гидрогеологических условий и строения таликов [Fortier et al., 2016; Lorenson et al., 2016; You et al., 2017]. Высокая информативность метода для решения задач подобного типа связана с четкой контрастностью мерзлых и талых пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) [Hauck et al., 2008]. Электротомография также хорошо зарекомендовала себя при исследовании термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии [Оленченко и др., 2017]. Их деятельность

связана с выносом межмерзлотными подземными водами песчаного материала и последующего формирования на дневной поверхности провальных форм рельефа [Ефимов, 1952; Шенелев, 1972; Гагарин и др., 2016]. Большое количество свежих провальных термосуффозионных воронок образовалось в районе руч. Улахан-Тарын, к которому приурочены круглогодично действующие источники подземных вод. В 500 м к юго-востоку от участка проявления термосуффозионного процесса расположена федеральная автомобильная дорога (ФАД) А-360 “Лена” (1102–1103-й километр),

единственная наземная транспортная артерия, соединяющая столицу Республики Саха (Якутия) Якутск с остальной частью России.

В течение 2013–2015 гг. в районе руч. Улахан-Тарын участок этой дороги находился на стадии реконструкции. Ранее существовавшая грунтовая дорога была перестроена в дорогу с асфальтным покрытием, а мостовой переход через ручей переделан в насыпь с водопропускной трубой. Реконструкция сопровождалась большим объемом земляных работ с рытьем котлована в долине ручья, в результате дно котлована было углублено на 3 м. От инженеров-строителей, работавших на этом участке трассы, авторы узнали, что им не известно о существовании неподалеку крупных родников и провалных форм рельефа.

Подобное углубление дна долины ручья Улахан-Тарын могло стать причиной появления очага разгрузки напорных межмерзлотных подземных вод и, соответственно, инициализации термосуффозионного процесса. В результате внезапное и прогрессирующее развитие термосуффозионных

воронок на дневной поверхности привело бы к частичному или полному разрушению дороги.

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования была оценка мест потенциального образования термосуффозионных провалов вдоль ФАД А-360 “Лена” на 1102–1103-м километре.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО УЧАСТКА

Участок исследований расположен в 54 км к северу от пос. Нижний Бестях, а на противоположном берегу р. Лены от последнего – г. Якутск.

Изучаемые термосуффозионные процессы проявляются в пределах IV надпойменной террасы р. Лены, сложенной преимущественно средне-неоплейстоценовыми песками с гравийно-галечниковым слоем в основании [Камалетдинов, 1982; Иванов, 1984]. Цоколь террасы сложен выветрелыми, трещиноватыми нижнекембрийскими известняками.

В районе источника подземных вод Улахан-Тарын в разное время было пробурено множество гидрогеологических и геотермических скважин глубиной от 12 до 520 м (рис. 1). Верхняя часть разреза до глубины 45 м представлена мелкозернистым песком с коэффициентом неоднородности 1.7–2.0, а ниже – среднезернистым с таким же коэффициентом неоднородности [Гагарин и др., 2016].

Толщина многолетнемерзлых пород (ММП) в пределах террасы изменяется от 200 до 400 м [Иванов, 1984]. Их температура на глубине нулевых годовых колебаний составляет $-0.2...-0.5$ °С, понижаясь в долине руч. Улахан-Тарын до -2.5 °С. Особенностью строения бестяхской террасы р. Лены является широкое развитие водоносных межмерзлотных таликов, кровля которых залегает на глубинах от 16 до 27 м. Питание их осуществляется через радиационно-тепловые и подозерные (сквозные и несквозные) талики. Разгрузка подземных вод происходит в долинах ручьев и речек, прорезающих бестяхскую террасу р. Лены, а также в некоторые озера. По условиям питания и циркуляции подземные воды относятся к надмерзлотно-межмерзлотным [Ефимов, 1952]. Наиболее крупнодебитный источник подземных вод приурочен к долине руч. Улахан-Тарын. Эти родники условно разделены на пять групп (цирков) – А, В, С, D, Е. Температура подземных вод на выходе на дневную поверхность в течение года постоянная и составляет 0.2 °С. Воды – гидрокарбонатные кальциево-магниевого с минерализацией около 200 мг/л, причем по сезонам года минерализация меняется [Павлова и др., 2016]. Межмерзлотные подземные воды – напорные. Например, в области их разгрузки пьезометрический уровень достигает 9 м [Гагарин и др., 2016].

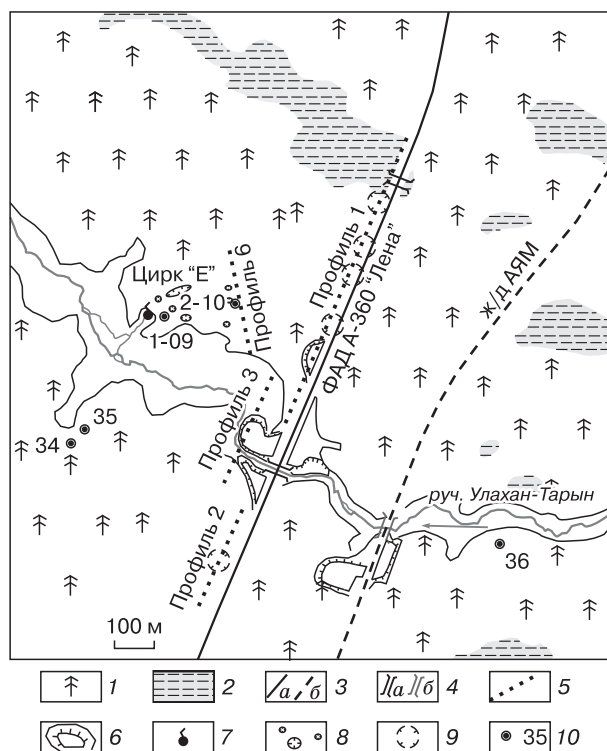


Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей в районе перехода ФАД А-360 “Лена” через руч. Улахан-Тарын (1104–1105-й километр).

1 – лес; 2 – заболоченное понижение; 3 – федеральная автомобильная дорога А-360 “Лена” (а) и Амуро-Якутская железная дорога (б); 4 – водопропускная труба (а) и мост (б); 5 – геофизический профиль; 6 – искусственная насыпь; 7 – источник подземных вод; 8 – термосуффозионная воронка; 9 – место потенциального развития термосуффозионной воронки; 10 – скважина и ее номер.

Подземными водами выносятся большое количество песчаного материала, слагающего межмерзлотный водоносный горизонт и его мерзлую кровлю. В склоне бестяхской террасы р. Лены над родником нередко наблюдаются пещеры, а на ее поверхности – провальные воронки, поноры и овраги [Толстихин, 1941; Ефимов, 1952; Шепелев, 1972; Гагарин и др., 2016]. Скорости образования провалов весьма высоки. Так, максимальное ежегодное приращение объема термосуффозионных просадок в районе цирка “Е” источника Улахан-Тарын достигало 3500 м³ [Гагарин и др., 2016]. Провальные воронки на этом участке развиваются в глубь террасы в северо-восточном направлении (см. рис. 1). Самая дальняя просадка рельефа зафиксирована на расстоянии 300 м от родника. Следует отметить, что еще через 500 м в том же направлении расположена ФАД А-360 “Лена”.

МЕТОДИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того чтобы определить место потенциального провала, необходимо знать геометрию межмерзлотного водоносного горизонта. Опыт наших исследований показал, что эта задача эффективно решается методом электротомографии [Оленченко и др., 2017]. В настоящей работе также применялась технология электротомографии в профильном варианте.

Для измерений использовалась 64-электродная многоканальная станция “Скала-64” (ООО “КБ Электротетри”, г. Новосибирск). Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. Глубина электрического зондирования достигала 80 м. Измерения проведены по четырем профилям длиной от 315 до 780 м с шагом между электродами 5 м. Обработка результатов зондирования осуществлялась в программах Res2Dinv и ZonRes2D [Бобачев, Горбунов, 2005].

На рис. 1 приведена схема расположения профилей. Профиль 1 находится на 1103-м километре ФАД А-360 “Лена” и протягивается вдоль дорожной насыпи до правого берега руч. Улахан-Тарын. Профиль 2 пролегает вдоль дорожной насыпи на 1102 км от левого берега руч. Улахан-Тарын. Профиль 3 пересекает долину руч. Улахан-Тарын и находится в 30 м выше по течению в пределах искусственно созданной насыпи. Профиль 6 был заложен еще в 2014 г. вкосте простирания направления развития термосуффозионных воронок в цирке “Е” [Оленченко и др., 2017]. Измерения по этому профилю проводились в 2015, 2016 и 2017 гг. (первые два года в начале лета, а последний год – в конце лета). В 20 м к западу от профиля 6 находится гидрогеологическая скважина № 2-10, которая в 2014 г. на глубине 16 м вскрыла межмерзлотный талик.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Интерпретация геоэлектрических разрезов была основана на априорных данных о мерзлотно-гидрогеологическом строении исследуемого участка, полученных по результатам бурения гидрогеологических скважин [Оленченко и др., 2017].

В 2015 г. было установлено, что по профилю 6 (рис. 2) в верхней части разреза выделяются деятельный слой и слой многолетнемерзлых песков до глубины 15–25 м (диапазон УЭС 1000–5000 Ом·м), ниже – водоносный межмерзлотный талик (УЭС 80–230 Ом·м). С глубины 60–70 м его подстилают местами талые водонасыщенные, местами замороженные среднекембрийские известняки (УЭС 200–5600 Ом·м). В межмерзлотном талике выделяются четыре локальных аномалии пониженного УЭС, интерпретируемые как каналы фильтрации.

Природа аномалий пониженных значений УЭС, связанных с каналами фильтрации подземных вод, дискуссионна. С одной стороны, лучшими коллекторскими и фильтрационными свойствами обладают хорошо промытые отсортированные пески крупной фракции, которые имеют повышенное сопротивление среди рыхлых псаммитов. С другой стороны, авторы отмечают термосуффозионное провалообразование над линейными аномалиями пониженного УЭС, а провалы образуются именно над зонами фильтрации подземных вод. Возможно, причиной пониженного УЭС в зонах развития термосуффозионных воронок является изменение структуры порового пространства в процессе термосуффозии. Предположим, что в состоянии покоя обводненный песчаный массив характеризуется одним достаточно высоким коэффициентом извилистости пор. При термосуффозии происходит вынос частиц песка и образование сквозных каналов фильтрации воды, по которым протекает электрический ток. Это приводит к уменьшению коэффициента извилистости пор в формуле Арчи и снижению значений УЭС породы. В работе [Алиаров, Рамазанов, 2010] показано, что с ростом водонасыщенности песков отмечается уменьшение извилистости пор, что, по мнению авторов, вполне логично, поскольку с увеличением водонасыщенности происходит упрощение токопроводящих областей поровых каналов. Однако пески межмерзлотного горизонта бестяхской террасы р. Лены, по данным бурения, находятся в обводненном состоянии. Следовательно, на структуру пор и уменьшение извилистости может повлиять только процесс выноса частиц в каналах фильтрации.

Повторные измерения в 2016 г. на участке профиля, не затрагивающем пойму руч. Улахан-Тарын, показали измененную картину распределения УЭС (см. рис. 2). На пикетах профиля 345–395 м с 2015 по 2016 г. отмечается деградация

ММП снизу, что отражено в сокращении толщины слоя УЭС в диапазоне 1000–3400 Ом·м с 23 до 19 м. Глубина залегания подошвы многолетней мерзлоты сократилась на 4 м. По-видимому, этому способствовал непрерывный в течение указанного промежутка времени теплообмен между мерзлой кровлей водоносного горизонта и фильтрационным потоком. Согласно рис. 2, распределение УЭС по горизонтали в диапазоне глубин 15–60 м с 2015 по 2017 гг. меняется значительно. Интерпретируемые фильтрационные потоки, имеющие значения УЭС до 230 Ом·м, меняют местоположение в пространстве, что свидетельствует о миграции путей движения подземных вод. При этом в 2015 и 2016 гг. в пределах рассматриваемого отрезка профиля, в проекции на дневную поверхность, наблюдалось активное развитие термосуффозионных воронок.

В 2017 г. положение многолетнемерзлых пород можно считать относительно стабильным. Разница в залегании подошвы мерзлоты на геоэлектрических профилях 2016 и 2017 гг. находится в пределах погрешности измерений и не превыша-

ет 2 м (см. рис. 2). Однако в межмерзлотном водоносном горизонте отмечается повышение УЭС и отсутствие ярко выраженных низких его значений по сравнению с 2016 г. Авторы интерпретируют это повышение УЭС как снижение интенсивности потока, инициирующего термосуффозию. Необходимо отметить, что в 2016 и 2017 гг. на этом участке профиля не наблюдалось термосуффозионных провалов земной поверхности. Следовательно, фильтрационный размыв горных пород в указанный период времени либо прекратился, либо временно снизилась его интенсивность.

Ранее проведенные исследования показали, что УЭС таликов с разной степенью увлажненности в песках бестяхской террасы р. Лены находятся в диапазоне 80–1000 Ом·м [Оленченко и др., 2017]. Фильтрационные потоки в межмерзлотном горизонте, инициирующие термосуффозию, на геоэлектрическом разрезе выделяются низкими УЭС (до 400 Ом·м). Термосуффозионные провалы приурочены к зонам наименьшей мощности ММП, под которыми сконцентрированы фильтрационные потоки (УЭС 80–400 Ом·м). Эти кри-

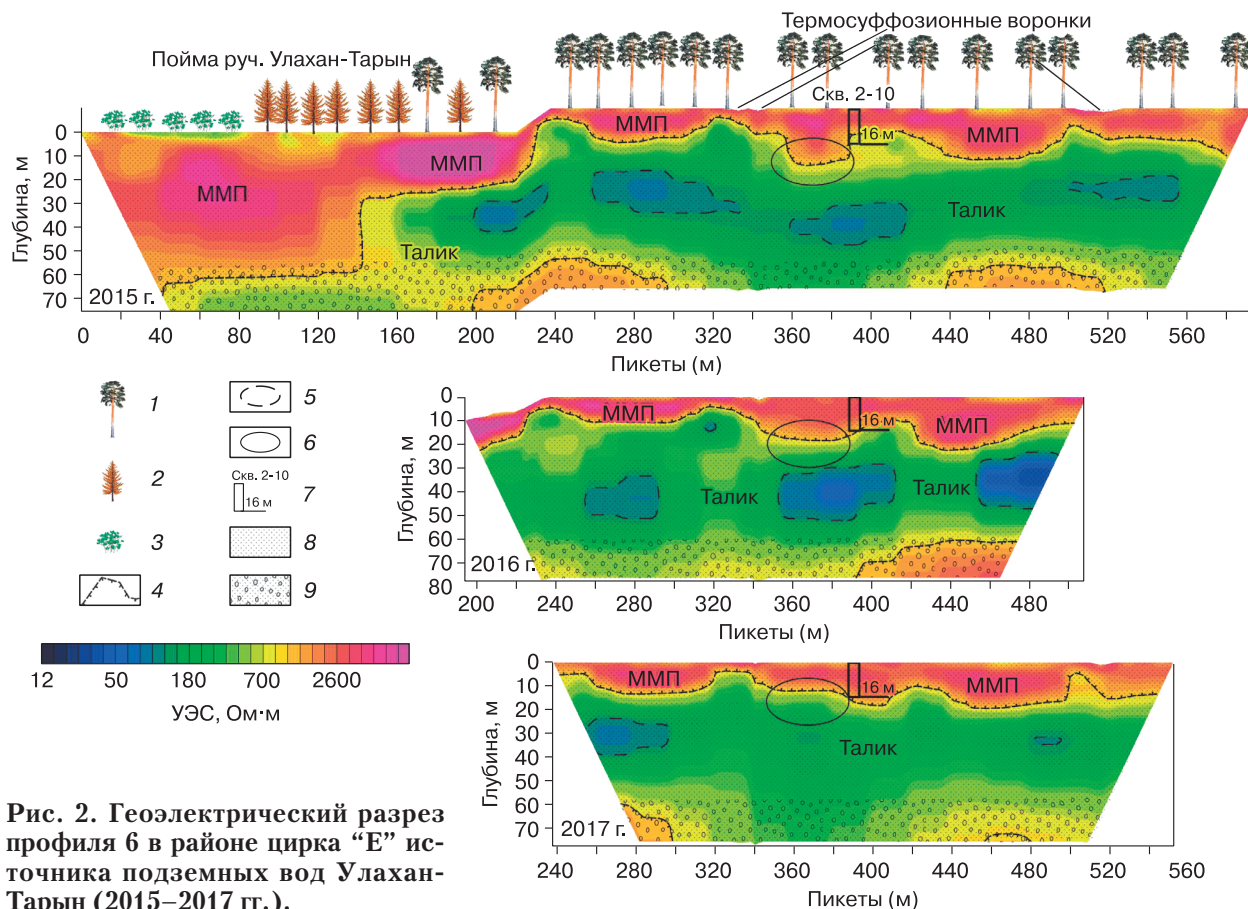


Рис. 2. Геоэлектрический разрез профиля в районе цирка “Е” источника подземных вод Улахан-Тарын (2015–2017 гг.).

1 – сосна; 2 – лиственница; 3 – кустарник; 4 – граница многолетнемерзлых пород; 5 – каналы фильтрации подземных вод; 6 – зона деградации ММП; 7 – скважина (вверху – ее номер, внизу – глубина); 8 – песок; 9 – гравийно-галечниковый слой с песчаным заполнителем.

терии были использованы для выявления зон потенциального термосуффозионного разуплотнения горных пород вдоль ФАД А-360 “Лена”.

Профиль 1 расположен вкрест простирания зоны транзита межмерзлотного водоносного горизонта и приурочен к подножию автодорожной на-

сыпи (см. рис. 1). Электротомография по этому профилю проведена в первых числах октября 2017 г. на момент максимального протаивания грунтов (3.5–4.0 м) и начала зимнего их промерзания. В верхней части геоэлектрического разреза с глубины 1.5–2 до 7–12 м (рис. 3, а) на пике-

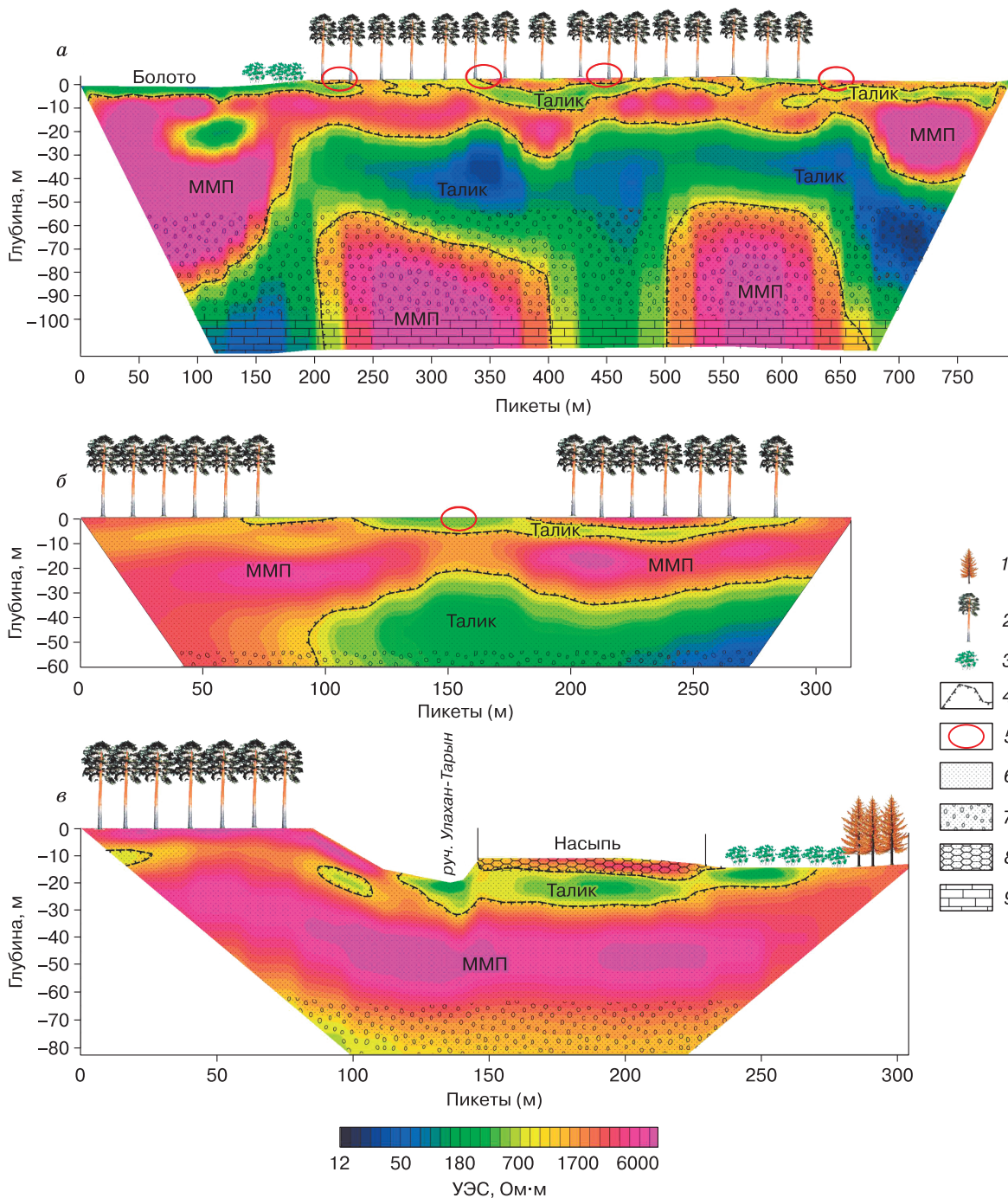


Рис. 3. Геоэлектрический разрез вдоль трассы ФАД А-360 “Лена” по профилям 1 (а), 2 (б) и 3 (в).

1 – лиственница; 2 – сосна; 3 – кустарник; 4 – граница ММП; 5 – участок потенциального развития термосуффозионного провала; 6 – песок; 7 – гравийно-галечниковый слой с песчаным заполнителем; 8 – песок с примесью дровя, щебня; 9 – известняк.

тах 250–780 м выделяется зона низких УЭС (400–800 Ом·м), интерпретируемая как субаэральная талая зона. Подобные талики могут образовываться на бестяхской террасе р. Лены в современных климатических условиях [Шендер и др., 1996; Мониторинг..., 2002; Гагарин, 2015]. Высокие значения УЭС (до 3600 Ом·м) на пикетах профиля 350–500 м до глубины 3–5 м (см. рис. 3, а) связаны не только с сезонным промерзанием горных пород, но и с крупнообломочными техногенными отложениями (щебень карбонатных пород) в верхней части геологического разреза, залегающими в основании полотна автодороги.

На пикетах профиля 1 от 0 до 200 м с поверхности до глубины 4.5 м выделена низкоомная (до 160 Ом·м) талая область (см. рис. 3, а). Она расположена в локальной болотной котловине, поэтому ниже по разрезу высоким УЭС выделяются льдонасыщенные низкотемпературные многолетнемерзлые породы (УЭС 2000–80 000 Ом·м). На отрезке профиля 100–150 м на глубинах 13–29 м локальная аномалия низкого УЭС (120–700 Ом·м) вызвана влиянием металлической водопропускной трубы в теле дорожной насыпи (см. рис. 3, а).

В пределах выровненной поверхности террасы (отрезок профиля 200–680 м) высокотемпературные многолетнемерзлые породы (УЭС 1000–5000 Ом·м) залегают до глубины в среднем 24 м (см. рис. 3, а). На пикетах 200–240, 320–370, 420–460 и 625–670 м эта глубина сокращается до 12–16 м. С пикета 680 м значения УЭС увеличиваются до 8000–90 000 Ом·м вплоть до глубины 42 м, что, вероятно, связано с наличием ММП вблизи склона долины ручья.

Межмерзлотный водоносный горизонт на геоэлектрическом разрезе расположен в пределах пикетов 200–750 м (см. рис. 3, а), его УЭС изменяется в диапазоне 25–400 Ом·м. Положение его кровли и подошвы на всем протяжении не постоянно. Наиболее низкие значения УЭС (25–60 Ом·м) отмечаются в зонах суффозионного переноса вещества фильтрационным потоком в поровом пространстве. Однако не над каждой аномалией низкого УЭС отмечается уменьшение мощности мерзлой толщи. Скорее всего, из года в год пути фильтрации могут меняться. Там, где мерзлота имеет наименьшую мощность, подземные воды оказывали длительное воздействие. Описываемое явление можно проследить в пределах пикетов 200–250, 330–370, 430–470 и 620–670 м (см. рис. 3, а). Наиболее тонкий слой ММП расположен над зоной наиболее низкого УЭС (до 70 Ом·м). С учетом того, что над указанными зонами расположены субаэральные надмерзлотные талики мощностью до 10 м, прочность кровли межмерзлотного водоносного горизонта здесь наиболее низкая по сравнению с сопредельной терри-

торией. Поэтому авторы считают, что на данных интервалах профиля 1 наиболее вероятны термосуффозионные просадки дневной поверхности.

В основании геоэлектрического разреза профиля 1, с глубины 60 м и ниже (см. рис. 3, а), отмечено чередование низкоомных (УЭС 40–700 Ом·м) и высокоомных (1300–20 000 Ом·м) участков. Они интерпретируются как талые и мерзлые породы. По данным разреза скв. 36 (см. рис. 1), с глубины 100 м разрез представлен выветрелыми известняками. Вероятно, эти коренные породы в трещинах выветривания могут содержать как лед, так и глинистые частицы с водой в жидкой фазе. Этим авторы объясняют значительный диапазон УЭС (40–20 000 Ом·м). Важно отметить, что с увеличением глубины чувствительность измерительной установки снижается, это приводит к неоднозначному решению обратной задачи. Поэтому интерпретацию данных участков на геоэлектрическом разрезе, расположенных ниже выделяемого межмерзлотного талого слоя, можно считать условной.

Профиль 2 также расположен вкрест простираения зоны транзита межмерзлотного водоносного горизонта (см. рис. 1). В отличие от профиля 1, профиль 2 находился в 15 м от автодорожной насыпи и пролегал от левого берега руч. Улахан-Тарын через сосновый лес, пересекая локальное понижение рельефа, поверхность которого ровная и покрыта луговой растительностью. В верхней части разреза на пикетах 110–290 м (см. рис. 3, б) до глубины 5–10 м выделяется зона УЭС от 400 до 770 Ом·м, интерпретируемая авторами как субаэральная талая зона. К началу октября, когда производились измерения, деятельный слой на бестяхской террасе р. Лены успевает промерзнуть на 1.5–2.0 м [Гагарин, 2015]. Предзимняя влажность песков этого слоя по всей его мощности не более 5–6 % [Шендер и др., 1996]. Первое обстоятельство показывает, что существующая на тот момент толщина промерзающего сезонноталого слоя не определяется по данным электротомографии, так как расстояние между электродами было много больше этой величины и составляло 5 м. Второе обстоятельство не позволяет отличить сухие талые пески от высокотемпературных мерзлых [Бобачев, Горбунов, 2005]. Поэтому на геоэлектрическом разрезе промерзающий деятельный слой не выделяется.

Многолетнемерзлые породы на профиле 2 (см. рис. 3, б) характеризуются значениями УЭС в диапазоне 1000–9000 Ом·м, причем на пикетах 0–100 м глубинность зондирования не позволила определить их подошву. На участках развития межмерзлотного водоносного горизонта (УЭС 40–400 Ом·м), в пределах пикетов 100–325 м, мощность мерзлоты не превышает 34 м. Важно отметить, что под локальным понижением в рельефе

на интервале профиля 110–180 м наблюдается наиболее тонкий (15 м) слой ММП и высокие значения УЭС (1350–2200 Ом·м) по сравнению со смежными участками (см. рис. 3, б). Вероятно, субаэральный талик существует здесь не один год и его отепляющее влияние на нижележащие многолетнемерзлые горные породы сказывается в уменьшении их мощности. Именно на этом отрезке профиля 2 вероятно образование термосуффозионного провала.

Электротомография по профилю 3 была сделана для выяснения влияния искусственной насыпи (пикеты 140–230 м) на геокриологическую обстановку в долине руч. Улахан-Тарын (см. рис. 1, 3). Эта насыпь представлена обломками карбонатных пород различной фракции с песчаным заполнителем, видимой мощностью 6–7 м. По данным электротомографии, толщина отсыпки изменяется от 5 до 7–8 м, а значения УЭС здесь составляют 1200–4000 Ом·м. Анализ геоэлектрического разреза показал, что в русле руч. Улахан-Тарын существует несквозной талик мощностью до 12 м (см. рис. 3, в), он выражается на разрезе с диапазоном УЭС от 170 до 1000 Ом·м на интервале профиля 120–140 м. На отрезке профиля 230–270 м отмечен заболоченный участок с кочкарником (см. рис. 3, в). Под этим участком фиксируются низкие значения УЭС (200–1000 Ом·м), как и под руслом ручья на отрезке профиля 120–140 м. Мощность талой области под болотом достигает 5–7 м. Оба участка соединяются в единую таликовую зону через захороненный искусственной насыпью талик толщиной 10–12 м с аналогичными значениями УЭС (см. рис. 3, в).

На левом берегу естественного сложения талые области отмечены отдельными линзами низкого УЭС (680–1000 Ом·м) на пикетах 0–25 и 90–105 м (см. рис. 3, в). Мощность этих линз составляет 5–7 м. Талики соединяются слоем с УЭС 1000–2000 Ом·м, характерным для многолетнемерзлых песков бестяхской террасы р. Лены, но значительно контрастирующим с выше и ниже залегающими слоями более высоких значений УЭС (3500–9000 Ом·м). Причем этот слой повторяет очертания рельефа и соединяется с долинным таликом. Вероятно, здесь в настоящее время промерзает субаэральный талик, что выражается в повышении УЭС разреза. Данное предположение подтверждается ландшафтными условиями на дневной поверхности, где произрастает зрелый густой сосновый лес с единичными лиственничными деревьями.

Нижняя часть профиля 3 представлена промороженными песками (УЭС 2700–9000 Ом·м) и мерзлыми скальными породами (1000–2000 Ом·м), возможно, водонасыщенными талыми (УЭС 600–1000 Ом·м) на отрезке профиля 100–150 м (см. рис. 3, в).

ВЫВОДЫ

Мониторинг изменения УЭС пород от года к году позволил проследить высокую динамичность мерзлотно-геологической обстановки на площади развития термосуффозионных процессов.

Установлено, что под воздействием межмерзлотного фильтрационного потока мощность верхнего слоя ММП за 4 года уменьшилась на 4 м (см. рис. 2).

На основе анализа геоэлектрических разрезов, полученных в разные годы, показано, что пути фильтрации межмерзлотных подземных вод непостоянны. Это выражается в увеличении или уменьшении УЭС локальных участков опорного слоя с пониженным до 400 Ом·м электросопротивлением. Рассматриваемый слой интерпретируется как водоносный межмерзлотный талик.

Вероятной причиной понижения УЭС пород в зонах фильтрации подземных вод является уменьшение извилистости пор в песке вследствие термосуффозионных процессов. Коэффициент извилистости пор влияет на значение УЭС в формуле Арчи, описывающей связь электросопротивления, пористости и структуры порового пространства.

По геофизическим данным, в верхней части разреза до глубины 10 м установлено существование надмерзлотных субаэральных таликов, которые потенциально могут иметь гидравлическую связь с межмерзлотным водоносным горизонтом.

По данным электротомографии выявлено пять областей возможного появления просадки поверхности (см. рис. 3, а, б). Как правило, в таких зонах наблюдается наименьшая мощность многолетнемерзлых пород, под ними в межмерзлотном водоносном горизонте отмечаются наиболее низкие значения УЭС (20–200 Ом·м), а с поверхности развит субаэральный талик.

В районе 1103-го километра ФАД А-360 “Лена” под крупной искусственно созданной площадкой зафиксировано существование погребенного талика, гидравлически связанного с подрусловым и пойменным таликами руч. Улахан-Тарын. Это одна из потенциально возможных зон развития термосуффузии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05053-р_восток_а), гранта Open Fund Project of SKLFSE (No. SKLFSE201701).

Литература

- Алияров Р.Ю., Рамазанов Р.А. Изменение электрического сопротивления пластов-коллекторов в процессе разработки залежей нефти и газа // Каротажник, 2010, № 3, с. 78–90.
- Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппара-

тура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 52–54.

Гагарин Л.А. Оценка современных условий формирования субаэриальных таликов в Центральной Якутии // Материалы XXI Всерос. совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2015, с. 76–80.

Гагарин Л.А., Семерня А.А., Лебедева Л.С. Оценка термосуффозионных процессов в Центральной Якутии на примере участка Улахан-Тарын // Геоэкология, инж. геология, гидрогеология, геокриология, 2016, № 3, с. 252–262.

Ефимов А.И. Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. М., Изд-во АН СССР, 1952, № 3, с. 60–105.

Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск, Наука, 1984, 126 с.

Камалетдинов В.А. Рельеф доколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья // Геология кайнозой Якутии. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1982, с. 94–103.

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

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

Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелёв В.В. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Вод. ресурсы, 2016, т. 43, № 2, с. 216–227.

Толстикхин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. М., Госгеолтехиздат, 1941, 201 с.

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., МГУ, 1996, кн. 1, с. 529–537.

Шепелёв В.В. Оценка эрозионно-суффозионной деятельности источников Центральной Якутии // Изв. вузов. Геология и разведка, 1972, № 9, с. 88–92.

Fortier R., Lemieux J.M., Molson J.W.H. et al. Geophysical investigation and monitoring of thermo-hydraulic conditions of closed talik and icing of the Kuuguluk River at Salluit, northern Quebec, Canada // AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, USA, 2016, NS23B-02.

Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge, Cambridge University Press, 2008, 238 p.

Lorenson T.D., Swarzenski P.W., Conaway C.H. et al. Extensive cryopegs on Barter Island, North Slope, Alaska // AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, USA, 2016, GC31H-1199.

You Y., Yu Q., Pan X. et al. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake // Permafrost and Periglacial Processes, 2017, vol. 28 (2), p. 470–476.

References

Aliyarov R.Yu., Ramazanov R.A. Changes in the reservoir bed resistivity while developing the oil and gas pools. Karotazhnik [Well Logger], 2010, No. 3, p. 78–90 (in Russian).

Bobachev A.A., Gorbunov A.A. 2D geoelectrical prospecting by resistivity and induced polarization technique: tools, methodo-

logy, software. Razvedka i Ochrana Nedr [Exploration and Protection of Resources], 2005, No. 12, p. 52–54 (in Russian).

Gagarin L.A. Assessment of recent conditions for development of subaerial talik in Central Yakutia. In: Proc. of the XXI All-Russian Conference on groundwater in Siberia and Far East, Yakutsk, IMZ SO RAN, 2015, p. 76–80.

Gagarin L.A., Semernya A.A., Lebedeva L.S. Assessment of thermal suffusion in Central Yakutia by the example of Ulakhan-tarin site. Geoecologia, Inzhenernaya Geologia, Hidrologia, Geokriologia [Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], 2016, No. 3, p. 252–262 (in Russian).

Efimov A.I. Non-freezing fresh spring Ulanakh-Taryn in Central Yakutia. In: Permafrost Investigation in Yakutia Republic. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1952, No. 3, p. 60–105 (in Russian).

Ivanov M.S. Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoi vpadiny [Cryogenic Structure of Quaternary Deposits in the Leno-Aldan Depression]. Novosibirsk, Nauka, 1998, 126 p. (in Russian).

Kamaletdinov V.A. The structure and pedestal relief of the cover of Quaternary sediments in the Lena-Amgin interfluvial area. In: Cenozoic Geology of Yakutia. Yakutsk, YaF SO AN SSSR, 1982, p. 94–103.

Shepelev V.V., Boitsov A.V., Oberman N.G. et al. Monitoring podzemnykh vod kriolitozony [Monitoring of Groundwaters of Permafrost Zone]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2002, 172 p. (in Russian).

Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I., Kolesnikov A.B., Efremov V.S. The structure of a site with thermosuffusion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 5, p. 14–23.

Pavlova N.A., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., Shepelev V.V. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia. Vodnye Resursy [Water Resources], 2016, vol. 43, No. 2, p. 353–363 (in Russian).

Tolstikhin N.I. Podzemnye vody merzloi zony litosfery [Ground water of the frozen zone of the lithosphere]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1941, 201 p. (in Russian).

Shender N.I., Boitsov A.V., Tetel'baum A.S. Formation of taliks and high-temperature frozen rocks in Central Yakutia. In: Proceeding of the First Conference of Geocryologists. Moscow, MSU, 1996, vol. 3, p. 290–297 (in Russian).

Shepelev V.V. Assessment of erosion and suffusion processes of springs in Central Yakutia. Izvestia vyzov. Geologia i Razvedka [Letters of High School: Geology and Exploration], 1972, No. 9, p. 88–92 (in Russian).

Fortier R., Lemieux J.M., Molson J.W.H. et al. Geophysical investigation and monitoring of thermo-hydraulic conditions of closed talik and icing of the Kuuguluk River at Salluit, northern Quebec, Canada. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, USA, 2016, NS23B-02.

Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge, Cambridge University Press, 2008, vol. 240, 238 p.

Lorenson T.D., Swarzenski P.W., Conaway C.H. et al. Extensive cryopegs on Barter Island, North Slope, Alaska. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, USA, 2016, GC31H-1199.

You Y., Yu Q., Pan X. et al. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake. Permafrost and Periglacial Processes, 2017, vol. 28 (2), p. 470–476.

*Поступила в редакцию 16 апреля 2018 г.,
после доработки – 4 декабря 2018 г.,
принята к публикации 14 декабря 2018 г.*