

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 550.37; 551.34; 556.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(16-26)

СТРОЕНИЕ УЧАСТКА РАЗВИТИЯ ТЕРМОСУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ПРЕДЕЛАХ БЕСТЯХСКОЙ ТЕРРАСЫ РЕКИ ЛЕНЫ
ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В.В. Оленченко¹, Л.А. Гагарин², И.И. Христофоров², А.Б. Колесников², В.С. Ефремов²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

² Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Республика Саха (Якутия), Россия; GagarinLA@gmail.com

Получены новые данные о строении участка развития термосуффозионных процессов с помощью методов электротомографии и георадиолокации. Построены геоэлектрические образы каналов напорной фильтрации подземных вод, определены границы участка потенциального образования новых термосуффозионных воронок и провалов. По геофизическим признакам установлено, что над зонами фильтрации отмечается деградация мерзлых пород вплоть до глубины подошвы деятельного слоя. Это является одним из факторов, приводящих к обрушению свода канала фильтрации и образованию воронок на поверхности. В свою очередь, обрушение кровли водоносного горизонта препятствует фильтрации и изменяет направление потока. При этом прекращается обогревающее действие подземных вод и происходит вторичное промерзание пород в окрестностях термосуффозионных воронок. Установлено, что изменение электрического сопротивления мерзлых пород коррелирует с характером растительности, – на затененных участках с лиственничным лесом удельное электрическое сопротивление мерзлых пород выше, чем в основании соснового редколесья. Результаты исследований позволили уточнить существующие представления о механизме образования термосуффозионных воронок и получить новые данные о геометрии водопроводящих таликов надмерзлотно-межмерзлотного комплекса.

Термосуффозия, суффозионные воронки, многолетнемерзлые породы, электротомография, георадиолокация

THE STRUCTURE OF A SITE WITH THERMO-SUFFUSION PROCESSES
WITHIN BESTYAKH TERRACE OF THE LENA RIVER,
ACCORDING TO GEOPHYSICAL DATA

V.V. Olenchenko¹, L.A. Gagarin², I.I. Khristoforov², A.B. Kolesnikov², V.S. Efremov²

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Acad. Koptuyuga ave., Novosibirsk, 630090, Russia; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

² Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; GagarinLA@gmail.com

The new data on geological structure of the area with developing thermo-suffusion processes obtained from electrical resistivity tomography and ground penetrating radar techniques allowed geoelectrical imaging of pressure filtration channels, and outlining potential thermo-suffusional craters and depressions. Based on the obtained geophysical characteristics, the phenomenon of permafrost degradation was discovered above the intra-permafrost aquifer, to a depth of the active layer base. Permafrost degradation is one of the forces that lead to the filtering channel collapse, prompting thereby the development of craters on the land surface. The collapsed top layer of the intra-permafrost aquifer changes the direction of groundwater flow, which, in turn, precludes the warming effect of the groundwater and provokes refreezing of the sand massif around thermo-suffusion craters. We found a correlation between variations in electrical resistivity in permafrost and changes in the vegetation canopy concentration: the frozen ground resistivity is higher for shaded areas overgrown with a larch stand, than for areas with a sparse growth of pine trees. The research results have provided insights about the formation mechanism of thermo-suffusion craters, and the geometry of water-bearing taliks of the supra/intra-permafrost complex.

Thermo-suffusion, suffusion craters, permafrost, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar

ВВЕДЕНИЕ

Суффозия играет важную роль в развитии природных и антропогенных ландшафтов. В последние годы в связи с климатическими изменениями планетарного масштаба отмечается активизация опасных экзогенных процессов в криолитозоне, в том числе и суффозионных. По сравнению с 1960-ми гг. интенсивность суффозионных процессов в пределах Центральной Якутии возросла в 1.6 раза [Гагарин, 2013]. Внезапное образование суффозионных воронок и провалов представляет потенциальную опасность для автомобильных и железнодорожных магистралей, а в некоторых случаях для населенных пунктов. Для оценки суффозионной опасности территорий необходимо изучение факторов, закономерностей и механизмов развития суффозии. Кроме того, полученные знания об условиях залегания подземных вод, закономерностях их распространения и условиях формирования могут быть использованы для оценки ресурсов подземных вод. Напорные подземные воды, инициализирующие суффозию, могут служить источником хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов.

В криолитозоне возникают так называемые термосуффозионные процессы, под которыми понимается механический вынос тонких частиц многолетнемерзлых пород при их оттаивании, приводящий к проседанию поверхности [Embleton, Thorne, 1979]. Примером развития термосуффозии является уникальный мерзлотно-гидрогеологический комплекс, приуроченный к бестяхской террасе р. Лены. Исследования этого комплекса проводятся с 40-х гг. прошлого века [Максимов, Толстихин, 1940; Ефимов, 1952; Анисимова, 1969, 1971; Шепелев, 1972, 1987; Бойцов, 2002; Гагарин, 2012, 2013, 2015]. К настоящему времени установлены характерные мерзлотно-гидрогеологические особенности строения террасы, оценено влияние изменений температурного режима горных пород в зоне разгрузки надмерзлотно-межмерзлотно-вод на интенсивность термосуффозионных процессов, оценена роль гидроклиматических факторов в активизации термосуффозионных процессов, изучена их годовая и многолетняя динамика и образуемые ими провальные формы рельефа.

Главная цель исследований – получение новых данных о строении участка развития термосуффозионных процессов с помощью современных геофизических технологий для уточнения существующих представлений о механизме образования термосуффозионных воронок и геометрии водопроводящих каналов таликов межмерзлотно-водного комплекса.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследований расположен в Центральной Якутии, в 50 км к югу от пос. Нижний

Бестях, в пределах IV (бестяхской) надпойменной террасы р. Лены. Поверхность здесь относительно ровная, а в изучаемом районе осложнена долиной ручья Улахан-Тарын с глубиной вреза порядка 30 м. Отложения бестяхской террасы в нижней части представлены аллювиальными средне- и мелкозернистыми незасоленными песками с гравийно-галечниковым слоем в основании, мощностью до 50–80 м. Возраст этих пород датируется средним плейстоценом. Четвертичные отложения подстилаются среднекембрийскими известняками, трещиноватыми в верхней части [Камалетдинов, 1982; Иванов, 1984].

Многолетнемерзлые породы на исследуемой территории имеют сплошное распространение. Мощность их в среднем составляет 200 м, возраста на некоторых участках до 400 м. Температура многолетнемерзлых пород на глубине годовых теплооборотов на выровненных участках террасы весьма высокая ($-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$), а в долине руч. Улахан-Тарын она понижается до $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерной мерзлотно-гидрогеологической особенностью бестяхской террасы р. Лены является широкое распространение сквозных и несквозных таликов радиационно-теплого, гидрогеогенного и гидрогенного типов [Ефимов, 1952; Анисимова, 1971; Шепелев, 1987; Бойцов, 2002; Михайлов, 2010].

В долине руч. Улахан-Тарын локализовано пять групп разгрузки подземных вод в виде термодрипков: А, В, С, D и Е. На участке исследований расположен термодрипк Е (рис. 1). Воды напорные, пресные, по составу – гидрокарбонатные кальциево-магниевого с минерализацией 0.2 г/л. Выходы подземных вод на дневную поверхность представляют собой чаще всего напорные струи (грифоны) различного диаметра (до 0.5 м).

Подземным потоком выносятся большое количество песка, а на поверхности террасы формируются провалы и воронки диаметром от первых метров до 30 м и глубиной от 1–2 до 15 м (профиль 6, см. рисунок на обложке). Предполагается [Гагарин, 2013], что в результате промерзания горных пород в месте разгрузки увеличивается криогенный напор и возрастает скорость фильтрационного потока. При этом подземные воды оказывают усиленное механическое и тепловое воздействие на вышележащие мерзлые горные породы и, размывая их, образуют пустоты (полости) в песчаном массиве. При достижении критического соотношения между шириной и высотой полости происходит локальное обрушение ее кровли, а на поверхности образуется воронка.

В апреле 2014 г. на участке исследований была пробурена гидрогеологическая скважина (скв. 2-14 на рис. 1), которая вскрыла два водоносных горизонта. Первый – в интервале 2.5–8.0 м, при этом уровень воды в скважине установился на глубине 2 м. Этот водоносный горизонт обладал

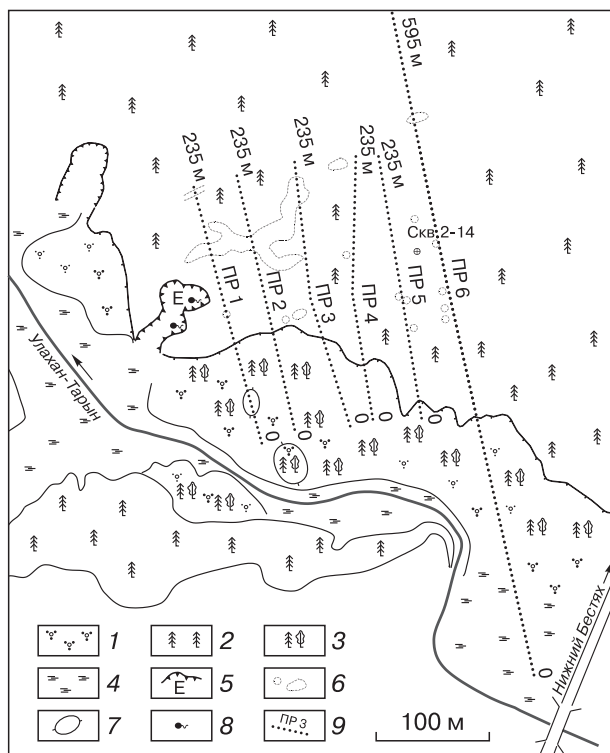


Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей:

1 – кустарниковая растительность, 2 – преимущественно хвойный лес, 3 – смешанный лес, 4 – заболоченный участок; 5 – термоцирк Е; 6 – термосуффозионные воронки и провалы; 7 – бугор пучения; 8 – выходы подземных вод; 9 – геофизический профиль и его номер.

пльвунными свойствами. Второй горизонт, мощностью 3 м, был вскрыт на глубине 16 м и подстилался многолетнемерзлыми породами. Уровень межмерзлотных вод в скважине установился также на глубине 2 м, что свидетельствует о гидравлической связи водоносных горизонтов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В пределах участка проведены исследования методами электротомографии (ЭТ) и георадиолокации (ГРЛ).

Электротомография относится к группе методов электрического сопротивления и представляет собой современную модификацию вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [Бобачёв, Горбунов, 2005; Балков и др., 2012; Loke, 2009]. При измерениях применялась многоэлектродная аппаратура «Скала-48» [Балков и др., 2012]. Последовательность подключения электродов соответствовала прямой и встречной поле-дипольным установкам, при этом исследования проводили на глубине порядка 85 м. Шаг измерений по профилю 5 м. Зондирования выполнены по шести субпа-

раллельным профилям длиной по 235 м (см. рис. 1). Один из профилей (№ 6) был продлен в обе стороны до 595 м добавлением 235 м к началу и 125 м к концу профиля.

Полученные в результате электрических зондирований данные были обработаны с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv [Loke, 2009]. В результате построены двумерные (разрезы) и трехмерная геоэлектрические модели среды. Горизонтальные срезы трехмерной геоэлектрической модели представлены в виде карт распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) на разных глубинах.

Георадиолокация относится к радиоволновым методам электроразведки. Она основана на различии горных пород по диэлектрической проницаемости. Георадиолокация выполнялась в комплексе с ЭТ в качестве вспомогательного метода. С помощью ГРЛ определялось положение подошвы деятельного слоя на момент исследований, выделялись обводненные участки в разрезе. При работах методом ГРЛ применялась аппаратура ОКО-2 с антенным блоком центральной частоты 150 МГц. Обработка данных ГРЛ была проведена при помощи программы Geoscan32, в результате были построены временные разрезы отраженного электромагнитного сигнала (радарограммы) по профилям. На временных разрезах по осям синфазности установлено положение отражающих границ, а по гиперболам дифракции от неоднородностей разреза определена средняя диэлектрическая проницаемость пород [Владов, Старовойтов, 2004], которая составила 6 отн. ед. Установленное экспериментальным путем значение диэлектрической проницаемости применялось для пересчета временных разрезов в глубинные.

Геофизические исследования выполнены в середине июля 2014 г., когда сезонноталый слой в пределах участка исследований достиг значительной мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация данных электротомографии

На рис. 2, а приведен геоэлектрический разрез по профилю 1, расположенному в верховье оврага, перпендикулярно направлению развития термоцирка Е (см. рис. 1). Профиль начинается в пойме р. Улахан-Тарын, а в интервале 80–90 м пересекает IV надпойменную террасу р. Лены с превышением порядка 14 м. В окрестностях пикетов (ПК) 120, 180 м отмечены области развития термосуффозионных воронок, а на ПК 230 – овраг. Причем в окрестности ПК 120 воронка старше по возрасту, чем провал в области ПК 180, где обнаружены свежие трещины оседания. На дне оврага (ПК 230) находилась вода.

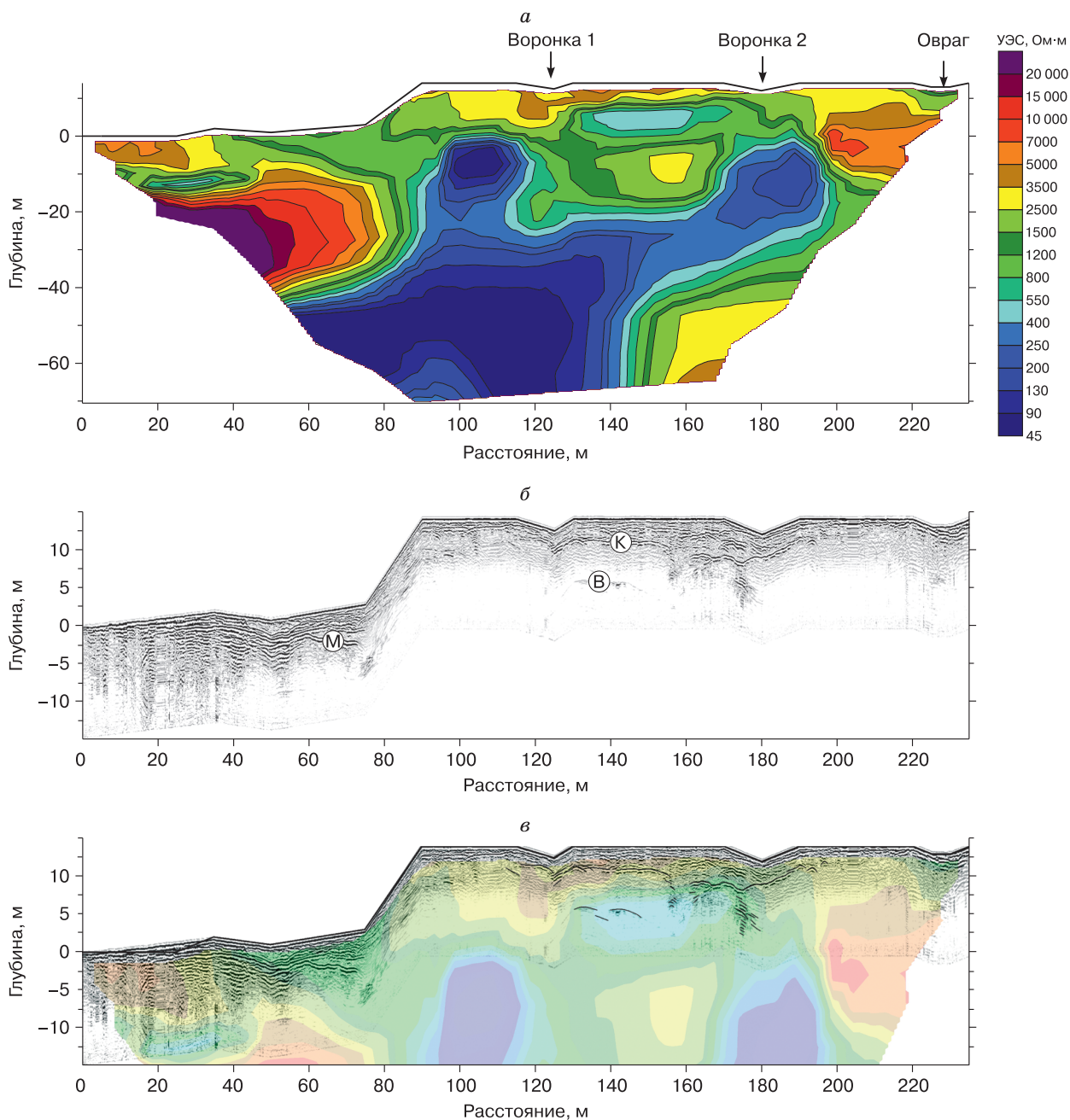


Рис. 2. Геоэлектрический разрез (а), радарограмма (б) и совмещенный геофизический разрез (в) по профилю 1.

Цветом показано распределение УЭС пород. Отражающие границы: М – подошва деятельного слоя; В – кровля водоносного горизонта; К – кровля сезонномерзлого слоя.

На разрезе УЭС поймы ручья (ПК 0–40 м) в приповерхностной части выделяется область высокого УЭС (3500–7000 Ом·м), связанная с наличием высокольдистых пород, которые обнажались в трещинах гидролакколита, пересекаемого профилем. С глубины 7–10 м в разрезе присутствует маломощный слой пониженного УЭС (до

400 Ом·м), интерпретируемый как межмерзлотный талик, приуроченный к пойме ручья. Ниже по разрезу отмечается аномалия высокого УЭС (5000–15 000 Ом·м), отражающая мерзлое высокольдистое строение осадочной толщи.

У подножия склона террасы УЭС пород понижается до 800–1000 Ом·м, что связано с суще-

ствованием талика, по которому разгружаются межмерзлотные воды. Верхняя часть разреза террасы сложена песками высокого УЭС (1200–5000 Ом·м), что объясняется их малой влажностью в пределах сезонноталого слоя и мерзлым состоянием глубже 3 м. Локальная область пониженного УЭС в интервале профиля 140–160 м на глубинах 7–14 м связана с областью фильтрации подземных вод. Водоупором последних являются мерзлые пески с УЭС 1000–2700 Ом·м. Такие же мерзлые пески, но с еще большим электросопротивлением (3500–7000 Ом·м) слагают днище оврага в районе ПК 230 (см. рис. 2, а).

Особый интерес представляют изометричные интенсивные аномалии низкого УЭС (90–250 Ом·м), обнаруженные на глубинах около 14 м в интервалах профиля 95–115 и 175–195 м (см. рис. 2, а). По мнению авторов, эти локальные области низкого УЭС связаны с основными каналами напорной фильтрации межмерзлотных вод. Над одним из таких каналов в окрестностях ПК 180 в настоящее время отмечается проседание поверхности (воронка 2 на рис. 2, а). Отмечено, что над выявленным каналом фильтрации сопротивление песков пониженное (800–2000 Ом·м), что свидетельствует об их талом состоянии. Вероятно, тепляющее влияние межмерзлотных подземных вод привело к деградации мерзлоты в вышележащей толще, вследствие чего происходит обрушение кровли в канале фильтрации, а на поверхности формируется просадка в виде воронки.

Над каналом фильтрации в интервале профиля 95–115 м пески характеризуются высоким УЭС (1500–2500 Ом·м), т. е. ниже глубины сезонного оттаивания и до кровли водоносного горизонта пески находятся в мерзлом состоянии. В этом месте на дневной поверхности воронки и провалы отсутствуют. Вероятно, данный канал фильтрации сформировался относительно недавно, и талая зона в кровле канала еще не успела образоваться.

Следует отметить, что в области старой воронки (воронка 1 на рис. 2, а) сопротивление пород высокое, что авторы объясняют процессами их промерзания после образования провала. В результате обвала кровли водоносного горизонта на пути фильтрационного потока возникает барраж. Это приводит к сокращению и изменению путей движения подземных вод. Тепляющее влияние воды на подобных участках уменьшается, и происходит постепенное промерзание массива горных пород.

С глубины около 40 м часть разреза характеризуется низким УЭС (менее 400 Ом·м) и находится в талом состоянии, а в интервале профиля 150–190 м, с глубины около 60 м, выделяются породы высокого УЭС, интерпретируемые как мерзлые карбонатные породы, слагающие цоколь бес-тахской террасы.

Анализ георадиолокационных данных

Георадиолокационный разрез несет информацию о строении верхней части разреза до глубины 10 м (см. рис. 2, б). В пойме ручья на радарограмме на глубине 2.0–3.5 м выделяется интенсивная отражающая граница (М на рис. 2, б), соответствующая текущему положению подошвы деятельного слоя. На поверхности террасы в интервале профиля 130–155 м на радарограмме видны отражающие границы, соответствующие кровле сезонномерзлого слоя (граница К на рис. 2, б) и кровле водоносного горизонта (граница В на рис. 2, б). По данным ГРЛ, кровля сезонномерзлого слоя залегает на глубине около 3 м, а водоносного – на 8 м, что согласуется с результатами ЭТ. В области образования воронок на радарограмме отмечаются характерные переотражения в зонах нарушенного строения. При этом под свежей воронкой 2 эти переотражения прослеживаются на большую глубину, чем под старой воронкой (воронка 1 на рис. 2, а).

Сопоставление радарограммы и геоэлектрического разреза показало, что выделенные отражающие границы, связанные с различием сред по диэлектрической проницаемости, в первом приближении согласуются с границами на геоэлектрическом разрезе по данным ЭТ (см. рис. 2, в). В пойме ручья отражающая граница М уточняет положение кровли мерзлоты. В верхней части разреза террасы сезонноталые и сезонномерзлые породы не дифференцируются по УЭС, так как сезонноталый слой имеет очень низкую влажность. В то же время, по данным ГРЛ отчетливо выделяется кровля сезонномерзлого слоя. Участок пониженного УЭС в интервале профиля 140–160 м отмечается на радарограмме фрагментарной отражающей границей В, на которой меняется фаза сигнала. Это говорит о том, что электромагнитный сигнал проникает из непроводящей среды в проводящую (обводненную). Таким образом, данные ЭТ и ГРЛ дополняют друг друга.

Сопоставление результатов бурения и геофизических данных

На рис. 3 приведены геоэлектрические разрезы по профилям 5 и 6, на которые вынесена проекция скв. 2-14 с отмеченными водоносными горизонтами. Скважина расположена на расстоянии 20 м от каждого профиля. Нужно отметить, что скв. 2-14 была пробурена в апреле 2014 г. “вслепую”, до проведения геофизических исследований. После того как в июле 2014 г. была выполнена съемка ЭТ, оказалось, что скважина не вскрывает ни один из каналов фильтрации, выделенных по данным ЭТ. На разрезе по профилю 5 верхний водоносный горизонт выделяется локальной областью пониженного УЭС, а нижний водоносный слой не выделяется либо из-за малых размеров, либо из-за того, что на период проведения ЭТ от-

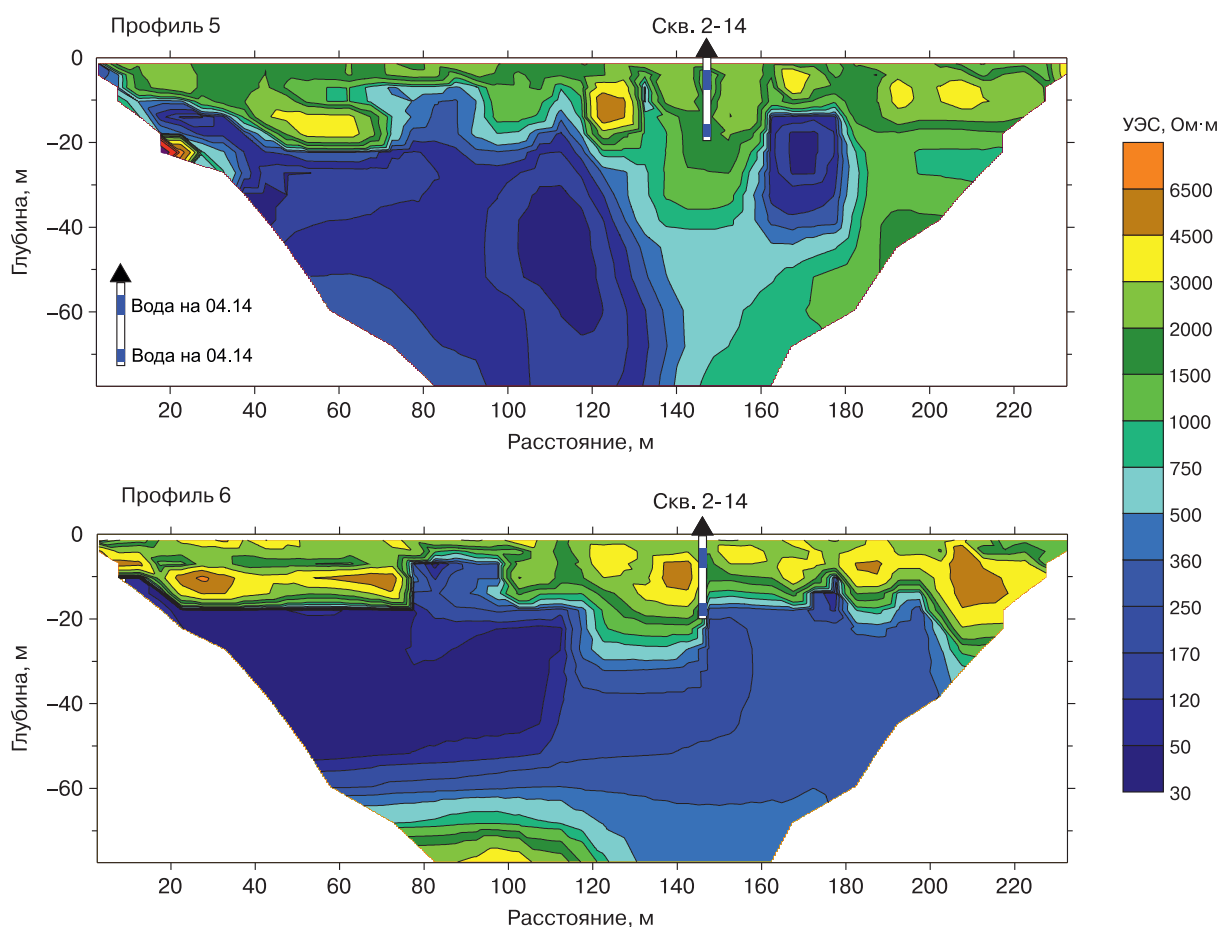


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по профилям 5, 6 и проекция скважины 2-14 на разрезы.

существовал вовсе. На разрезе по профилю 6 проекция скважины на профиль попадает на породы высокого УЭС, которые представлены мерзлыми песками. Однако справа от проекции скважины характер геоэлектрического разреза существенно меняется. Отсюда следует, что геокриологический разрез справа от скважины отличается от того, который получен по данным бурения.

Сравнение данных бурения и ЭТ показывает, что геокриологический разрез, полученный в результате бурения в апреле, не согласуется с геоэлектрическими разрезами по профилям 5 и 6, полученными в июле. С одной стороны, это объясняется тем, что мы имеем дело с высокородинамичной гидрогеологической системой с изменяющимися геометрией и дебетами. Поэтому весьма вероятно, что вскрытые в апреле водоносные горизонты не были такими же водообильными в июле. С другой стороны, скважина расположена на расстоянии в 20 м от каждого из профилей. Анализируя разрезы УЭС, можно сказать, что ни на одном разрезе нет выдержанного по мощности

и электросопротивлению слоя протяженностью более 20 м. Поэтому сопоставление разреза по скважине, полученного в стороне от профиля, с геоэлектрическим не вполне корректно.

Влияние локальных факторов на геоэлектрическое строение разреза

К локальным факторам, влияющим на строение многолетнемерзлой толщи (ММТ), относятся экспозиция склона, элементы рельефа, тип растительности, участки снежных заносов, затененность поверхности, заболоченность и ряд других. Под действием таких факторов изменяется температура многолетнемерзлых пород (ММП), льдистость, толщина деятельного слоя, что находит отражение в геоэлектрических полях.

Для оценки строения многолетнемерзлой толщи на стыке элементов рельефа – поверхности бестяжской террасы и долины руч. Улахан-Тарын – были проведены измерения методом ЭТ на удлиненном профиле 6. Этот профиль был продлен в пойму руч. Улахан-Тарын и по поверхности террасы. Его длина составила 595 м. На рис. 4

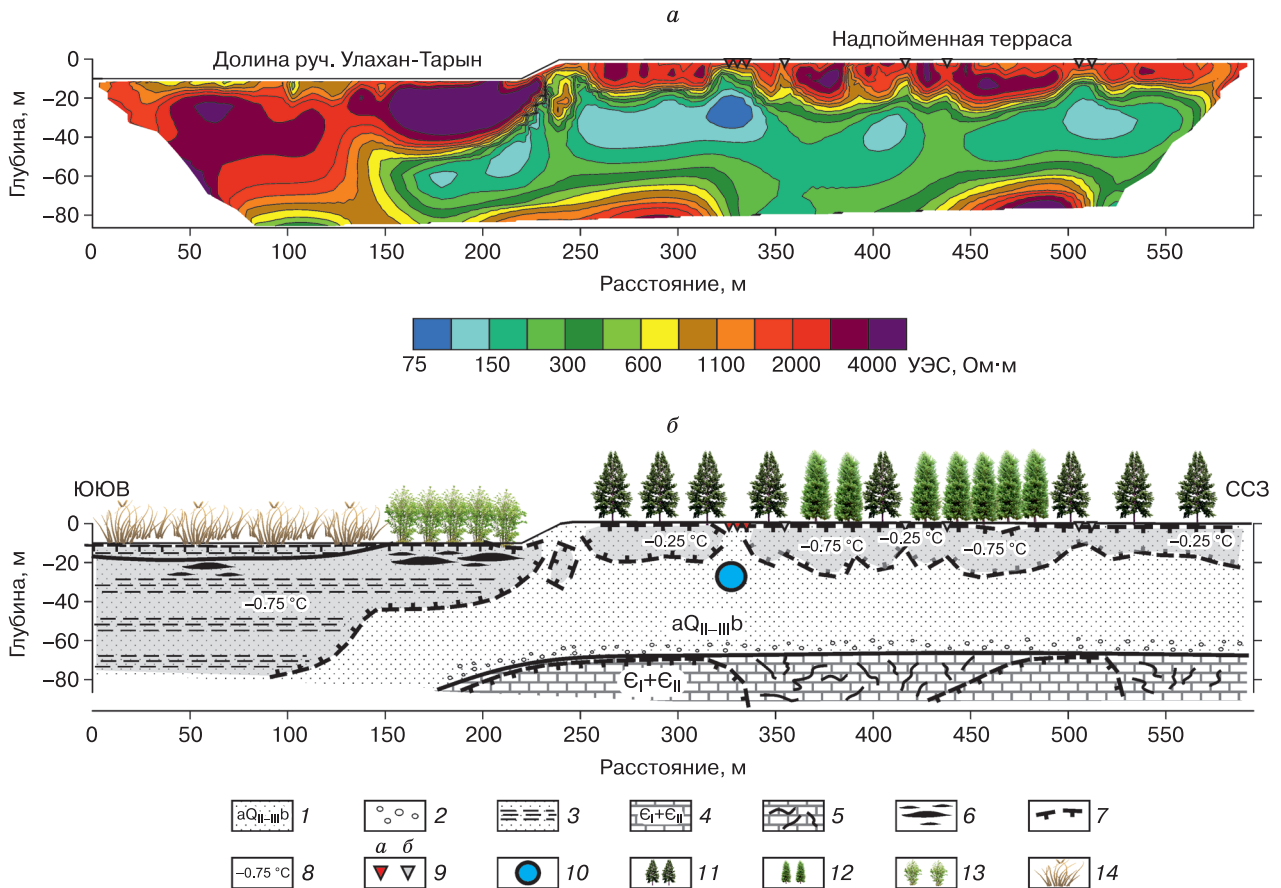


Рис. 4. Геоэлектрический разрез (а) по профилю б и его интерпретация (б):

1 – средне- и верхнечетвертичные аллювиальные отложения бестяхской террасы, пески мощностью до 60 м; 2 – гравийно-галечниковый материал; 3 – переслаивание песков и супесей; 4 – нижнекембрийские отложения, известняки, доломиты с прослоями мергелей; 5 – зона повышенной трещиноватости по разлому в коренных породах; 6 – высокольдистые породы, прослойки льда; 7 – граница ММП; 8 – предполагаемая температура ММП по электроразведочным данным; 9 – воронки молодые (а), старые (б); 10 – канал напорной фильтрации в межмерзлотном талике; 11 – сосновое редколесье; 12 – густой лиственный лес с подлеском; 13 – кустарник; 14 – травянистая растительность заболоченной поймы.

представлены геоэлектрический разрез по профилю и его интерпретация.

Как и на профиле 1, в пределах террасы верхняя часть разреза до глубины 15–25 м характеризуется высоким УЭС (1000–5000 Ом·м), что объясняется мерзлым состоянием песков, а в сезонном слое – их малой влажностью (см. рис. 4, а).

Ниже залегает толща мощностью 35–45 м с УЭС 80–230 Ом·м, интерпретируемая как талые пески разной влажности.

В основании разреза, с глубины 60–70 м, выделяется кровля пород высокого УЭС (800–5600 Ом·м), которые, по априорным данным, представлены мерзлыми среднекембрийскими карбонатами. Их электросопротивление не выдержано по простиранию. В интервале профиля 350–400 м УЭС коренных пород понижается до 200 Ом·м, что может быть связано с обводненной разломной зоной в коренных породах.

Геоэлектрический разрез в долине руч. Улахан-Тарын характеризуется очень высоким УЭС (2600–6800 Ом·м), что связано с высокой льдистостью горных пород верхней части разреза и, вероятно, их низкой температурой. Лишь в приповерхностной части разреза в интервале профиля 0–150 м выделяются породы с пониженным УЭС до 1000–500 Ом·м. Характер геоэлектрического разреза в зоне сочленения поймы ручья и террасы говорит о том, что межмерзлотный талик частично распространяется в пойму.

Согласно геокриологической интерпретации разреза сопротивлений (см. рис. 4, б), в пойме руч. Улахан-Тарын мощность мерзлых пород максимальная, а локальные области высокого УЭС соответствуют участкам развития льдистых горных пород и пластовых льдов. Глубина сезонного оттаивания в заболоченной части поймы не превышает 1 м. Для оценки температуры пород ис-

пользована зависимость УЭС литологических разностей от температуры [Рекомендации..., 1987; СП-11-105-97..., 2004]. Согласно этой зависимости, температура мерзлых пород здесь составляет около $-0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На бестяхской террасе строение многолетнемерзлой толщи двухслойное, с межмерзлотным таликом. Подошва верхнего мерзлого слоя залегает на глубине 15–25 м. Кровля второго мерзлого горизонта отмечается с глубины около 65 м. Такое строение многолетнемерзлой толщи, установленное по данным ЭТ, согласуется с результатами исследований прошлых лет методом ВЭЗ и бурением [Белых и др., 1985].

Локальные области повышенного УЭС (3000–4700 Ом·м) мерзлых пород в верхнем слое интерпретируются как участки с пониженной температурой ($-0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$). На дневной поверхности над такими участками произрастает плотный лиственный лес с густым подлеском, затеняющим поверхность. Там, где развит сосновый лес, сопротивление верхнего слоя мерзлых пород ниже и изменяется в пределах 1500–2500 Ом·м, что, согласно зависимости УЭС песка от температуры [Рекомендации..., 1987; СП-11-105-97..., 2004], соответствует $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оценки температуры, выполненные по данным ЭТ, близки к термометрическим данным о температуре мерзлой толщи для этой территории ($-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) [Гагарин, 2013].

В межмерзлотном талике локальная область низкого УЭС (до 75 Ом·м) интерпретируется как зона фильтрации подземных вод (интервал профиля 300–350 м). На подобных участках отмечается сокращение мощности верхнего мерзлого горизонта вплоть до глубины сезонного оттаивания. В этом месте на поверхности в настоящее время образуются суффозионные воронки (см. рисунок на обложке).

В тех местах, где суффозионные воронки старые, отмечается увеличение мощности слоя высокого УЭС, что связано с промерзанием пород при отсутствии обогревающего влияния подземного стока. Прекращение подземного стока выражается в повышении УЭС пород межмерзлотного талика.

Анализ трехмерной геоэлектрической модели

В результате интерпретации площадных измерений ЭТ была построена трехмерная геоэлектрическая модель участка (рис. 5). В объемной модели полупрозрачной областью обозначены породы высокого УЭС. Породы с УЭС ниже 400 Ом·м ограничены сплошной изоповерхностью. Фактически эта изоповерхность оконтуривает пути фильтрации подземных вод (подземные реки) в межмерзлотном талике. Трубообразное тело низкого УЭС представляет собой межмерзлотный горизонт, подземные воды которого разгружаются в цирке Е.

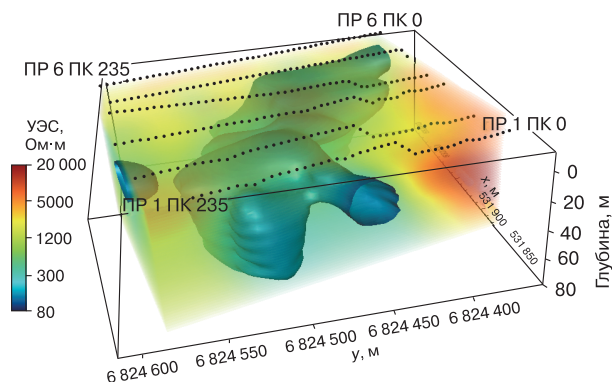


Рис. 5. Объемная геоэлектрическая модель по результатам трехмерной инверсии данных электротомографии.

Внутри модели – изоповерхность 400 Ом·м.

Рассмотрим особенности распределения УЭС на площади развития термосуффозионных воронок. На рис. 6 приведены карты распределения УЭС (карты изоом). Карты представляют собой срезы трехмерной модели в горизонтальной плоскости по глубинам 7 и 15 м. Глубина среза 7 м отражает мерзлое или талое состояние пород на глубине, близкой к глубине подошвы деятельного слоя. По данным бурения и термометрии, максимальная глубина сезонного протаивания на участке исследований составляет 4–6 м [Гагарин, 2015]. В тех местах, где отмечается низкое УЭС пород (талые пески), высока вероятность возникновения термосуффозионных воронок. Например, аномалия низкого УЭС на профиле 6 сопровождается на поверхности свежими провалами (см. рисунок на обложке). Логично ожидать, что провалы в скором времени будут образовываться вдоль линейной аномалии низкого УЭС (менее 550 Ом·м), пересекающей профили 6, 5 и 4. Часть воронок и провалов попадает в области высокого УЭС (более 2500 Ом·м). В настоящее время эти провалы прекратили свое развитие и под ними началась аградация мерзлоты. Локальная область низкого УЭС между профилями 2 и 3 приурочена к подножию склона террасы. На этом участке отмечается место разгрузки подземных вод.

Срез по глубине 15 м отражает распространение путей фильтрации подземных вод по площади. Так как глубина залегания подошвы первого от поверхности мерзлого слоя составляет в среднем 20 м, то участки пониженного УЭС (менее 1000 Ом·м) на карте изоом по глубине 15 м маркируют зоны протаивания над каналами фильтрации (см. рис. 6). Провалы на поверхности формируются как раз над зонами пониженного электросопротивления.

Таким образом, технология электротомографии дает возможность выявлять пути фильтрации

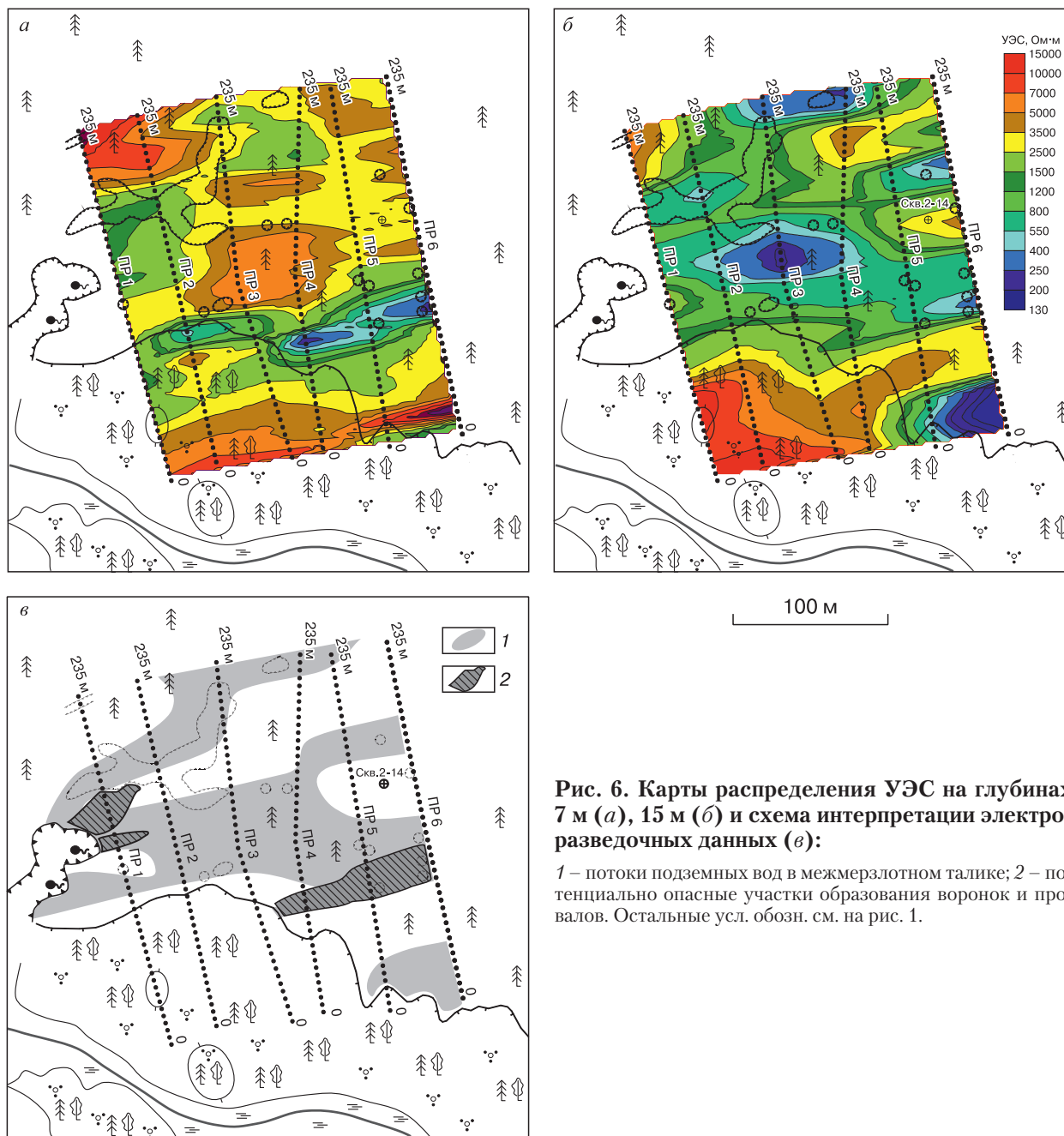


Рис. 6. Карты распределения УЭС на глубинах 7 м (а), 15 м (б) и схема интерпретации электро-разведочных данных (в):

1 – потоки подземных вод в межмерзлотном талике; 2 – потенциально опасные участки образования воронок и провалов. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

подземных вод в межмерзлотном талике и прогнозировать места образования термосуффозионных воронок.

ВЫВОДЫ

Результаты зондирования методом ЭТ показали, что в пределах участка исследований развит межмерзлотный талик в интервале глубин 20–60 м. Эти выводы согласуются с данными исследований прошлых лет – бурением и вертикальными электрическими зондированиями [Белых и др., 1985]. Однако данные бурения и ВЭЗ не могут

сформировать представление о путях фильтрации подземных вод в межмерзлотном талике, поскольку скважины и точки ВЭЗ располагались по редкой сети наблюдения. О существовании каналов можно судить только по наличию выходов напорных подземных вод, формирующих пещеры в склоне бестяхской террасы в долине ручья Улахан-Тарын. По данным двумерной ЭТ на разрезах УЭС впервые удалось выявить локальные изометричные аномалии низкого электросопротивления, которые представляют собой геоэлектрический образ каналов напорной фильтрации. Установле-

но, что именно над такими зонами низкого УЭС происходит современное образование воронок и провалов. Анализ геоэлектрических разрезов показал, что над путями напорной фильтрации отмечается уменьшение мощности верхнего мерзлого горизонта вплоть до глубины сезонного оттаивания. Таким образом, данные ЭТ подтверждают представления о том, что подземные воды оказывают усиленное тепловое воздействие на вышележащие мерзлые горные породы. При этом происходит периодическое обрушение талой кровли, а на поверхности образуются воронки и провалы.

Электроразведочные данные позволили также сделать предположение, что после образования воронки или провала обрушившийся массив пород сокращает и изменяет пути фильтрации подземных вод. При этом отепляющее действие последних в зоне обрушения прекращается, и со временем многолетняя мерзлота в области провала начинает восстанавливаться. Это предположение основано на том факте, что УЭС песка в окрестностях старых воронок очень высокое, а на дне таких провалов скапливается вода, свидетельствующая о наличии мерзлого водоупора.

Анализ латерального распределения УЭС многолетнемерзлых пород верхней части разреза показал взаимосвязь электросопротивления с типом растительности на поверхности. В тех местах, где растительность гуще и представлена лиственницей, УЭС мерзлых пород выше, чем в местах соснового редколесья. Авторы предполагают, что эта связь опосредованная, через температуру мерзлых пород. Растительный покров изменяет теплообмен между почвой и атмосферой [Ершов, 2002]. В летний период густой растительный покров задерживает солнечную радиацию, что приводит к охлаждению пород. Таким образом, температура ММП под густым лиственничным лесом будет ниже, а глубина сезонного оттаивания меньше. В ходе маршрутных исследований в 2015 г. проведено ландшафтное описание территории в районе источника Улахан-Тарын. Отмечено, что термосуффозионное оврагообразование значительно меняет ландшафтную обстановку: изменяется рельеф, мерзлотно-гидрогеологические условия, и, как следствие, со временем начинается сукцессия растительности. Так, в зоне активного развития термосуффозионных воронок (например, в цирке Е) произрастает редкий сосновый лес, а на участках старых балок – преимущественно лиственница, мох, кочкарник. Однородный литологический состав верхней части разреза террасы позволяет утверждать, что изменения УЭС мерзлого горизонта связаны именно с температурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате геофизических исследований и натурных наблюдений установлено следующее.

По данным двумерной ЭТ получены геоэлектрические образы путей напорной фильтрации подземных вод, которые выделяются на разрезах изометричными аномалиями низкого УЭС. Над этими путями (каналами) отмечается сокращение мощности высокоомного слоя, интерпретируемого как мерзлая толща, вплоть до глубины сезонного оттаивания. В этих же местах на поверхности образуются воронки и провалы. Участки возможного образования термосуффозионных воронок оконтуриваются по характерным вытянутым областям пониженного электросопротивления на срезах УЭС трехмерной модели по кровле многолетнемерзлой толщи.

При образовании воронки обрушение пород свода в канале напорной фильтрации приводит к перекрытию потока, изменению направления движения подземных вод и прекращению отепляющего действия воды в зоне провала. В последующем происходит вторичное промерзание массива горных пород, что выражается в высоком УЭС разреза в области старых воронок и провалов.

Изменения УЭС в мерзлом слое коррелируют с характером растительности на поверхности, что, скорее всего, связано с температурой пород. На затененных участках с лиственничным лесом УЭС мерзлых пород выше, чем в основании соснового редколесья.

В целом методы ГРЛ и ЭТ показали удовлетворительное согласие с данными термометрии и бурения. Использование этих методов в режиме мониторинга позволит дать качественную прогнозную оценку развития термосуффозионного провалообразования, вплоть до выявления зоны возможного обрушения дневной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-45-05053_р_восток_а).

Литература

- Анисимова Н.П.** Некоторые особенности формирования химического состава озерного и наледного льда в Центральной Якутии // *Наледи Сибири*. М., Наука, 1969, с. 183–190.
Anisimova, N.P., 1969. Some peculiarities of formation of the chemical composition of lake and aufice ice in Central Yakutia, in: *Aufeis in Siberia*. Nauka, Moscow, pp. 183–190. (in Russian)
- Анисимова Н.П.** Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии) // *Н.П. Анисимова*. М., Наука, 1971, 196 с.
Anisimova, N.P., 1971. Formation of the Chemical Composition of Groundwater in Taliks (by the example of Central Yakutia). Nauka, Moscow, 196 pp. (in Russian)
- Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А.** Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // *Геофизика*, 2012, № 6, с. 54–63.
Balkov, E.V., Panin, G.L., Manstein, Y.A., Manstein, A.K., Beloborodov, V.A., 2012. Electrical resistivity tomography: tools, methodology and application experience. *Geofizika*, No. 6, 54–63.
- Белых В.А., Дмитриев Е.М., Довгополик А.И.** Отчет о результатах комплексной гидрогеологической и инженерно-

геологической съемки м-ба 1:200 000 территории строительства железной дороги Беркакит–Якутск на участке Томмот–Якутск на площади листов Р-52-XXII, XXVII, XXVIII, XXXII, XXXIII, О-52-1,II (1981–1985 гг.): Геол. отчет. Росгеолфонд, Центральное фондохранилище, М., 1985, 2352 с.

Belykh, V.A., Dmitriev, E.M., Dovgopolik, A.I., 1985. A report on the results of the 1:200 000 integrated hydrogeological and geotechnical investigations of the Berkakit–Yakutsk railway construction site (Tommot–Yakutsk segment) for the area mapped on sheets P-52-XXII, XXVII, XXVIII, XXXII, XXXIII, O-52-1,II (1981–1985). Geological Report. Rosgeofond, Tsentralnoe fondokhranilishche, Moscow, 2352 pp.

Бобачёв А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 52–54.

Bobachev, A.A., Gorbunov, A.A., 2005. 2D geoelectrical prospecting by resistivity and induced polarization technique: tools, methodology, software. Razvedka i okhrana nedr, No. 12, 52–54.

Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2002, 23 с.

Boitsov, A.V., 2002. Formation conditions and regime of groundwater of supra- and interpermafrost discharge in Central Yakutia: Extended abstract of Cand. Sci. (geol.-mineral.) Dissertation, Yakutsk, 23 pp. (in Russian)

Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: Учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.

Vladov, M.L., Starovoytov, A.V. (Eds.), 2004. Introduction to the Ground Penetrating Radar technique. Textbook. Moscow University Press, Moscow 153 pp. (in Russian)

Гагарин Л.А. Исследование термосуффозионных процессов в Центральной Якутии // Наука и образование, 2012, № 2, с. 41–45.

Gagarin, L.A., 2012. The study of suffosion processes in Central Yakutia. Nauka i obrazovanie, No. 2, 41–45.

Гагарин Л.А. Динамика термосуффозионных процессов в криолитозоне (на примере Центральной Якутии): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2013, 21 с.

Gagarin, L.A., 2013. Dynamics of thermo-suffosion processes in the permafrost zone (the case of Central Yakutia): Extended abstract of Cand. Sci. (geol.-mineral.) Dissertation, Yakutsk, 21 pp. (in Russian)

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

Gagarin, L.A., 2015. Assessment of recent conditions for development of subareal talik in Central Yakutia, in: Proc. of the XXI All-Russian Conference on groundwater in Siberia and Far East. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, p. 76–80. (in Russian)

Ершов Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.

Yershov, E.D., 2002. General Geocryology. Moscow University Press, Moscow, 682 pp. (in Russian)

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.

Efimov, A.I., 1952. Non-freezing fresh spring Ulanakh-Taryn in Central Yakutia. Issledovanie vechnoi merzloty v Yakutskoi respublike. Izd-vo AN SSSR, Moscow, No. 3, p. 60–105. (in Russian)

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

Ivanov, M.S., 1984. Cryogenic Structure of Quaternary Deposits in the Leno-Aldan Depression. Nauka, Novosibirsk, 126 pp. (in Russian)

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

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

Максимов В.М., Толстихин Н.И. К вопросу о гидрогеологических условиях окрестностей Якутска // Докл. АН СССР, 1940, т. 28, № 1, с. 14–20.

Maksimov, V.M., Tolstikhin, N.I., 1940. To the problem of hydrogeological (permafrost) conditions in the vicinities of Yakutsk. Dokl. AN SSSR, 28 (1), 14–20.

Михайлов В.М. Разнообразие таликов речных долин и их систематизация // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 43–51.

Mikhailov, V.M., 2010. Diversity and systematization of taliks in river valleys. Earth's Cryosphere, XIV (3), 43–51. (in Russian)

Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке / ПНИИИС. М., Стройиздат, 1987, 88 с.

Recommendations on integration of geophysical techniques in permafrost surveys, 1987. PNIIS, Strizdat, Moscow, 88 pp. (in Russian)

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

SP 11-105-97, 2004. Engineering geological surveys for purposes of construction. Part IV. Rules and regulations on geophysical surveys. Gosstroj RF, Moscow, 58 pp. (in Russian)

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

Shepelev, V.V., 1972. Assessment of erosion and suffosion processes of springs in Central Yakutia. Izv. vuzov: Geologia i razvedka, No. 9, 88–92.

Шепелев В.В. Родниковые воды Якутии / В.В. Шепелев. Якутск, Кн. изд-во, 1987, 128 с.

Shepelev, V.V., 1987. Spring waters of Yakutia. Yakut. kn. izd-vo, Yakutsk, 128 pp. (in Russian)

Embleton, C., Thornes, J.B. (ed.). Process in geomorphology. London, UK, Arnold-Heinemann, 1979, 436 p.

Loke, M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009 [Электрон. ресурс]. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (дата обращения: 22.12.2015).

Поступила в редакцию
10 января 2016 г.