

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 67–79

<https://www.sibran.ru>

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.3; 550.8.05
DOI: 10.15372/KZ20240606
EDN: YSPEJP

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ ИНДИКАТОРОВ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

В.В. Оленченко^{1,*}, А.А. Землянскова²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*Автор для контакта; e-mail: olenchenkovv@yandex.ru

Обосновано использование фито- и биоиндикаторов для интерпретации данных геоэлектрики при изучении мерзлых разрезов. Исследования проводились с помощью методов электротомографии и георадиолокации в разных климатических и геокриологических условиях от Тянь-Шана до Магаданской области. В каждом районе были выделены свои ландшафтные признаки геокриологических условий и сопоставлены с геоэлектрическими разрезами или данными георадиолокации. Показано, что в Центральной Якутии определенные виды лиственниц, а в Забайкалье берез в сочетании с высоким сопротивлением пород указывают на наличие мерзлых пород с пониженной температурой. На территории Северо-Востока России тополя и чозении растут в области развития таликовых зон, что дает основание интерпретировать участки низкого электрического сопротивления пород под ними как талики, а не как пиритизацию или повышенную глинистость. В Тянь-Шане установлена корреляционная связь электрического сопротивления каменного глетчера и его возраста, на который указывает размер лишайника рода *Rhizocarpon* sp. В условиях горной местности аномалии низкого сопротивления в местах скопления крупных гнезд муравьев означают глубокое залегание кровли мерзлых пород или наличие сквозных таликов в разломных зонах. Учет ландшафтных индикаторов геокриологических условий позволяет уменьшить неоднозначность геологической интерпретации данных геоэлектрики.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, электротомография, георадиолокация, талик, удельное электрическое сопротивление, криолитозона, фитоиндикация, биоиндикация.

Ссылка для цитирования: Оленченко В.В., Землянскова А.А. Применение ландшафтных индикаторов геокриологических условий при интерпретации данных геоэлектрики // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 67–79. DOI: 10.15372/KZ20240606. EDN: YSPEJP.

APPLICATION OF LANDSCAPE INDICATORS OF GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS IN INTERPRETATION OF GEOELECTRIC DATA

V.V. Olenchenko^{1,*}, A.A. Zemlianskova²

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akademika Koptyuga Ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia

² St. Petersburg State University,
Universitetskaya emb. 7–9, St. Petersburg, 199034 Russia

*Corresponding author; e-mail: olenchenkovv@yandex.ru

The use of phyto- and bioindicators for interpreting geoelectric data in the study of permafrost sections is substantiated. The research used electrical resistivity tomography and ground-penetrating radar methods in various climatic and geocryological conditions from the Tien Shan to the Magadan region. In each region, specific landscape features of geocryological conditions were identified and compared with geoelectric sections or ground-penetrating radar data. Certain types of larch stands in Central Yakutia and birch stands in Transbaikalia together with data on high rock resistivity indicate the presence of permafrost with reduced temperature. In the northeast of Russia, poplars and willows (*chosenia*) grow in the area of talik zones, which allows interpreting areas of low electrical resistivity of rocks under them as taliks rather than the areas with pyritization or increased clay content. In the Tien Shan, a correlation was established between the electrical resistivity of a rock glacier and its age indicated by the size of *Rhizocarpon* sp. lichens. In mountainous areas, anomalies of low resistivity in places, where large anthills are concentrated, indicate the deep occurrence of permafrost table or

open taliks in fault zones. Thus, taking into account landscape indicators of geocryological conditions helps us to reduce the ambiguity of geological interpretation of geoelectric data.

Keywords: permafrost, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar survey, talik, resistivity, cryosphere, phytoindication, bioindication.

ВВЕДЕНИЕ

Геоморфологические и биологические (фитоиндикаторы) признаки геокриологических условий нашли широкое применение при геокриологическом картировании [Рекомендации..., 1984; Ермохина, 2009]. Определение условий среды по характеру и состоянию растительности называется фитоиндикацией. Например, для севера Западной Сибири комплексные ландшафтные индикаторы в виде сомкнутых хвойных лесов, мохово-кустарничкового или сфагнового редколесья на плоских, слабодренированных участках означают, что многолетнемерзлые породы (ММП) представлены островами и линзами [Рекомендации..., 1984]. Если же на территории исследований в заболоченных депрессиях и долинах водотоков встречаются отдельные бугры пучения, а растительность представлена кустарничково-мохово-лишайниковым сообществом, то такие индикаторы говорят о сплошном распространении многолетнемерзлых пород [Рекомендации..., 1984].

Известными фитоиндикаторами пойменных таликов являются заросли чозений и тополей [Михайлов, 2014]. Интенсивная циркуляция подземных и поверхностных вод является обязательным условием как для формирования таликов, так и для произрастания чозений и тополей, поскольку этим растениям необходимо проточное увлажнение корнеобитаемого слоя [Михайлов, 2005].

Одним из методов фитоиндикации является лихеноиндикация (лихенометрия) – изучение возрастной структуры сообществ эпилитных лишайников, которые непрерывно колонизируют все образующиеся в ландшафте каменистые поверхности. Строго говоря, лишайники – это не растения, а симбиоз грибов и низших растений – водорослей. Применение лишайников в качестве индикаторов возраста основано на том, что они растут от центра к периферии, а продолжительность жизни отдельных слоевиц достигает нескольких тысяч лет и сравнима с возрастом исследуемых форм рельефа [Галанин, 2012]. Лихенометрический метод был предложен Р.Е. Бешелем в середине прошлого века [Beschel, 1957], а широкое развитие метод получил в палеогеографических и геоморфологических исследованиях [Галанин, 2012].

Биологическим признаком, указывающим на геокриологические условия, являются муравейники. В работе [Берман, 2007] показано, что для выживания в суровых условиях муравьи не только обладают значительной холодостойчивостью, но

и проявляют адаптивную стратегию в виде “выбора” участка для зимовки и расположения камер на возможно большей глубине, где температура зимой не опускается ниже порога холодостойчивости. Известно, что вид муравьев *Formica lemani* никогда не встречается на территориях с близко залегающей “водоупорной” мерзлотой, которая служит главным фактором, ограничивающим распространение этого вида, но часто встречается в области прерывистого типа ММП [Берман, 2007]. Наличие мерзлых пород в разрезе практически никак не сказывается на биотическом распределении лишь тех видов, которые располагают гнезда вблизи поверхности.

Температура пород в разных ландшафтах оказывает влияние и на их электрические свойства – удельное электрическое сопротивление (УЭС), поляризуемость и относительную диэлектрическую проницаемость, поэтому геоморфологические признаки и фитоиндикаторы геокриологических условий необходимо использовать при анализе данных геоэлектрики для снижения неоднозначности интерпретации.

Блестящий пример комплексирования фитоиндикации и результатов геофизических методов для выделения многолетнемерзлых пород в условиях горной криолитозоны приведен в работе [Ishikawa, 2003]. М. Ишикава разделил растительные сообщества на криофильные низких кустарников, хионафильные сообщества кустарников, хионафильные луга и приснегниковые сообщества. Используя анализ растительных сообществ в различных ландшафтных условиях как индикаторов ММП, информацию о температуре под снежным покровом и распределении УЭС в разрезе, М. Ишикава выделил зоны таликов и линзы ММП на фоне талых пород.

В работе [Stiegler et al., 2014] приведен пример комплексной интерпретации результатов картирования растительности, электротомографии и георадиолокации. Было установлено, что на участках криофильных сообществ (*Sphagnum rubellum*) развиты неглубокозалегающие ММП островного типа. При этом растительный покров (мох) является азональным фактором, способствующим сохранению мерзлых пород в горах на уровне намного ниже региональной нижней границы распространения ММП.

Целью исследования являлось обоснование применения фито- и биоиндикаторов геокрио-

логических условий при интерпретации данных геоэлектрики. Основной задачей было сопоставление геоэлектрических моделей и георадиолокационных разрезов с ландшафтными признаками геокриологических условий на эталонных объектах.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве эталонных объектов с ландшафтными признаками геокриологических условий выбраны:

- каменный глетчер Городецкий (Тянь-Шань);
- участок произрастания лиственницы Каяндеры (даурская) (*Larix cajanderi*) на бестяхской террасе (Центральная Якутия);
- ерниковые заросли кустарниковой берескеты (*Betula fruticosa*) в долине ручья (Центральное Забайкалье);
- участок произрастания чозении в поймах рек Анмангында и Нелканджа (Магаданская область);
- группа гнезд муравьев вида *Formica aquilonia* на особо охраняемой природной территории (ООПТ) "Муравейники Арахлея" (Забайкалье);
- гнезда муравьев вида *Formica exsecta* на южном склоне Курайского хребта (Горный Алтай).

Эталонные объекты расположены в районах с различными типами распространения ММП: островным и прерывистым в Забайкалье, сплошным в Магаданской области и Центральной Якутии (рис. 1), а также в криолитозоне альпийского типа на Алтае и в Тянь-Шане.

Причины, по которым в качестве эталонов выбраны именно эти участки, следующие.

Каменный глетчер (КГ) Городецкий является типичным аблационным и одним из крупнейших в Заилийском Алатау, который изучается на протяжении десятков лет [Марченко, 2003; Gorbunov et al., 1992]. На этом объекте выполнена лихенометрия – оценка возраста каменистых поверхностей по размеру талломов (слоевищ) лишайника рода *Rhizocarpon* (рис. 2) по методике, описанной в работе [Галанин и др., 2017].

Участок произрастания лиственницы Каяндеры (даурская) (*Larix cajanderi*) на бестяхской террасе (Центральная Якутия) является классическим случаем сукцессии при изменении геокриологических условий, происходящей в результате затухания термосуффозионных процессов [Гагарин и др., 2023]. Согласно исследованию [Поздняков, 1975], наиболее характерная черта даурской лиственницы – привязанность и приспособленность к специфическим условиям, создаваемым сплошным залеганием ММП.

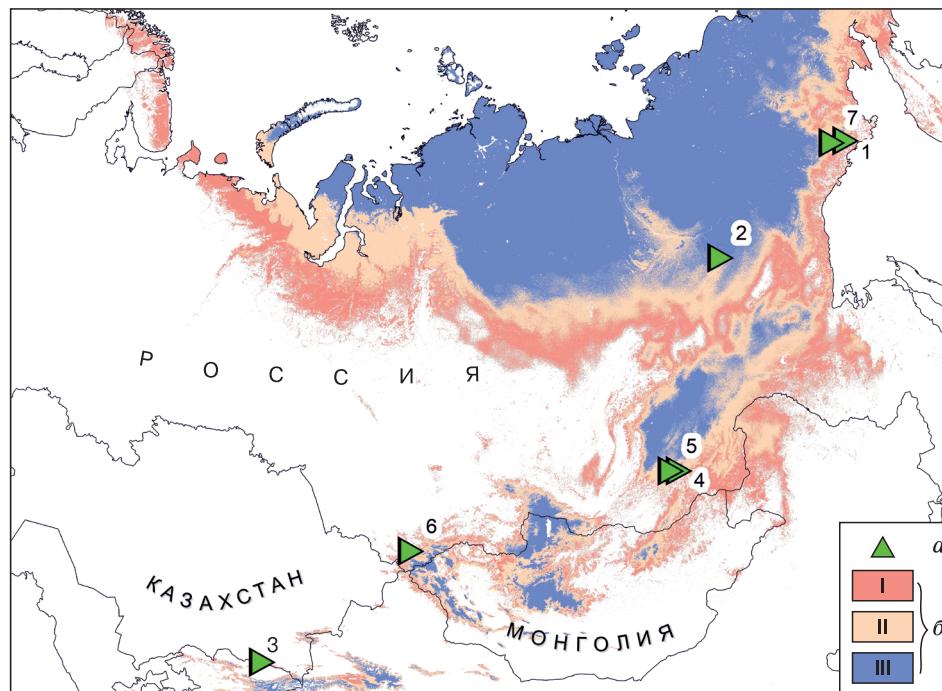


Рис. 1. Объекты исследования, расположенные в разных мерзлотных условиях.

a – объекты исследования: 1 – р. Нелканджа, 2 – бестяхская терраса, 3 – каменный глетчер Городецкого, 4 – Читинский район, 5 – ООПТ "Муравейники Арахлея", 6 – Курайский хребет, 7 – наледная поляна р. Анмангында; *б* – типы распространения многолетнемерзлых пород по [Obu et al., 2018]: I – островной, II – прерывистый, III – сплошной.



Рис. 2. Лишайник *Rhizocarpon* sp. на каменном глетчере Городецкий.

Фото В.В. Оленченко, 11.08.2013 г.

Ерниковые заросли кустарниковой берески *Betula fruticosa* и переувлажнение долины ручья в Забайкальском крае – это причина пониженной температуры пород и неглубокого залегания кровли ММП [Маслов и др., 2005]. Кустарниковая береска – это типичный микротермофит, требующий для своего развития малого количества тепла [Немова, Александрова, 2001].

Чозениевые рощи в долинах рек Анмангында и Нелканджа в Магаданской области являются общепризнанным фитоиндикатором таликов и интенсивной циркуляции подземных и поверхностных вод [Михайлов, 2005, 2014].

Гнезда муравьев вида *Formica aquilonia* на ООПТ “Муравейники Арахлея” описаны научным сотрудником Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, к.б.н. О.В. Корсуном [2007], а гнезда муравьев *Formica exsecta* на южном склоне Курайского хребта изучены и охарактеризованы сотрудником Института систематики и экологии животных СО РАН, д.б.н. Т.А. Новгородовой в ходе специальной совместной экспедиции геофизиков и биологов.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические исследования методом электротомографии (ЭТ) выполнялись аппаратурой Скала-48 или Скала-48к12 с шагом 5 м. Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродной либо представляла комбинацию симметричной Шлюмберже и дипольно-осевой установок. С помощью программ Res2DInv проведена инверсия и построены геоэлектрические разрезы эталонных объектов.

В пойме р. Нелканджа на наледи в марте 2022 г. были проведены специальные исследования методом георадиолокации для получения типичных радарограмм на эталонном объекте, представляющем наледную поляну с островами чо-

зениевых рощ. Зондирования выполнялись с помощью георадара ОКО-3 с антенным блоком центральной частоты 250 МГц. Пересчет временного разреза в глубинный произведен для средней относительной диэлектрической проницаемости среды (льда), равной 3.2.

Подробное описание методики геофизических исследований, выполненных на каменном глетчере Городецкий, в Центральной Якутии, Забайкальском крае и на участке наледной поляны р. Анмангында, представлены соответственно в публикациях [Галанин и др., 2017; Оленченко, Кондратьев, 2017; Гагарин и др., 2023; Оленченко и др., 2023].

Детальный план исследований на ООПТ “Муравейники Арахлея” и на южном склоне Курайского хребта даны в [Оленченко, 2014], в настоящей работе представлено обобщение результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение мерзлотного состояния пород каменных глетчеров по данным электротомографии и лихенометрии

При изучении каменных глетчеров важной задачей является установление наличия льда-цемента внутри обломочного материала. Оценка мерзлого или талого состояния КГ осуществляется с помощью электротомографии, что показано в многочисленных работах зарубежных и отечественных авторов [Дьякова и др., 2020; Kneisel, 2006; Leopold et al., 2011]. Породы, сцепленные льдом, выделяются аномально высоким УЭС, достигающим нескольких десятков и сотен километров на метр.

При изучении строения КГ Городецкий [Галанин и др., 2015] было установлено, что изменения УЭС и структуры геоэлектрического разреза по профилю хорошо коррелируют с границами разновозрастных генераций КГ (рис. 3). Первая наиболее древняя генерация характеризуется низкими значениями УЭС 0.5–8.0 кОм·м, за исключением отдельных блоков с УЭС до 65 кОм·м. Последние представляют собой, вероятно, небольшие линзы метаморфического льда или каменно-ледяного материала. Ложе КГ в пределах этой генерации полностью талое и водонасыщенное, что выражается в низком значении УЭС пород (менее 1 кОм·м).

Геоэлектрический разрез второй генерации представлен блоком льдистых пород с УЭС 65–170 кОм·м. Пониженное УЭС пород в основании означает то, что ложе каменного глетчера здесь преимущественно талое. Третья, а также другие более молодые генерации КГ характеризуются в среднем значениями УЭС от 100 кОм·м и выше.

Следует отметить, что в результате автоматической 2D инверсии данных электротомографии

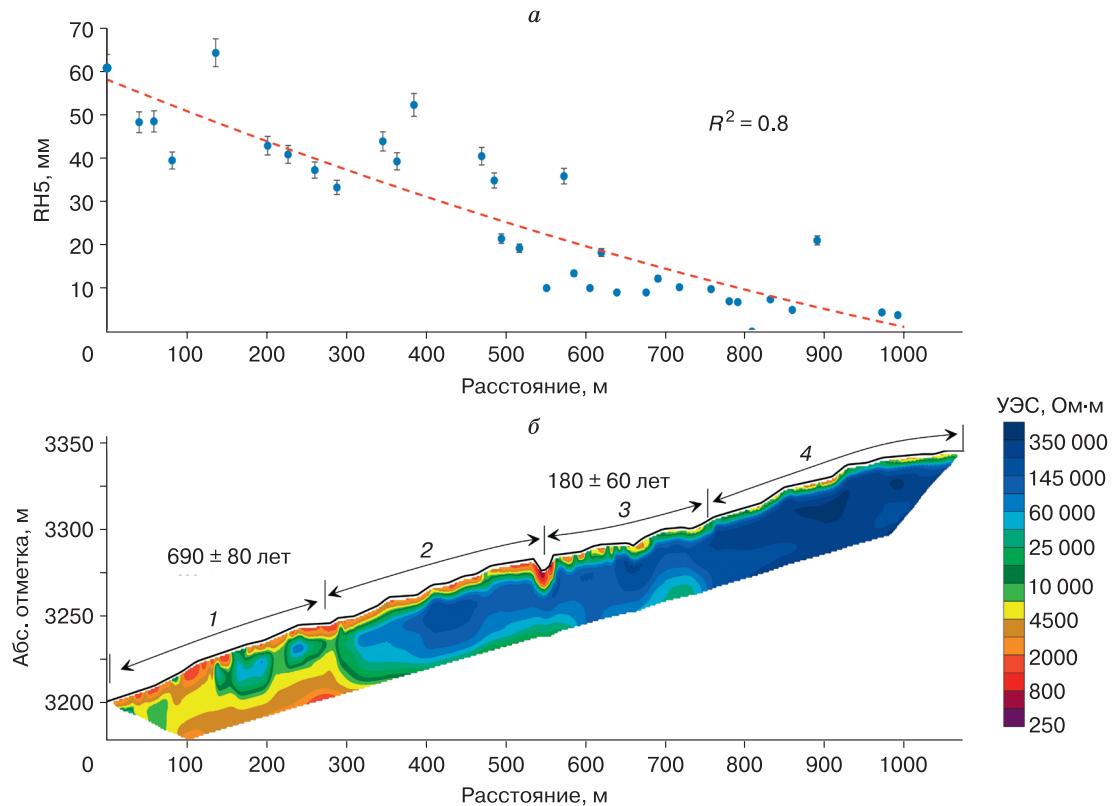


Рис. 3. Распределение возрастного индекса RH5 вдоль геофизического профиля (а) и геоэлектрический разрез каменного глетчера Городецкий (б).

1 – первая (ранняя) генерация; 2 – генерация с пассивными блоками метаморфического льда; 3 – пассивная поздняя генерация, образованная крупными блоками метаморфического льда; 4 – неактивная генерация, образованная полями метаморфического льда.

мощность каменно-ледяного ядра определяется завышенной, а его сопротивление заниженным. Программа Res2Dinv подбирает менее контрастную модель среды, а принцип эквивалентности слоистых разрезов позволяет это сделать с небольшой невязкой. Таким образом, по данным электротомографии нет возможности достоверно оценить мощность мерзлого ядра каменного глетчера, однако на качественном уровне прослеживается изменение УЭС в этом слое по латерали и определить его блоковое или монолитное строение.

Результаты лихенометрии [Галанин и др., 2017] показали, что в направлении от древней генерации КГ внизу склона к молодой генерации вверху склона размер талломов лишайника *Rhizocarpon sp.* (индекс RH5) уменьшается в среднем от 50–65 до 4–5 мм, а их возраст изменяется в пределах от (690 ± 80) лет в нижних частях каменного глетчера до (180 ± 60) лет в верхней части (см. рис. 3, а).

При этом в наиболее древней части КГ наблюдается пониженное УЭС пород с отдельными высокоомными блоками, представляющими собой

каменно-ледяные ядра с температурой, близкой к 0°C . Здесь на поверхности КГ отмечаются самые крупные талломы лишайника *Rhizocarpon sp.*

В более молодых генерациях КГ возрастает сплошность и УЭС высокоомного слоя, т. е. повышается льдистость и понижается температура каменно-ледяного ядра, при этом на поверхности отмечается закономерное уменьшение размеров талломов лишайника *Rhizocarpon sp.*

Сопоставление УЭС пород, полученных по результатам электротомографии, на глубине 10 м с возрастом отдельных генераций показало корреляционную связь этих параметров с коэффициентом -0.81 (рис. 4). Достоверность аппроксимации невысокая (0.6) в силу того, что для древних генераций КГ в выборку попадают значения как талого массива пород, так и отдельных ледяных ядер, различающихся по УЭС на порядок. Тем не менее зависимость показывает, что чем моложе каменный глетчер, тем выше УЭС его ядра.

Установленную зависимость УЭС отдельных генераций КГ от возраста, вероятно, можно использовать и для соседних подобных объектов,

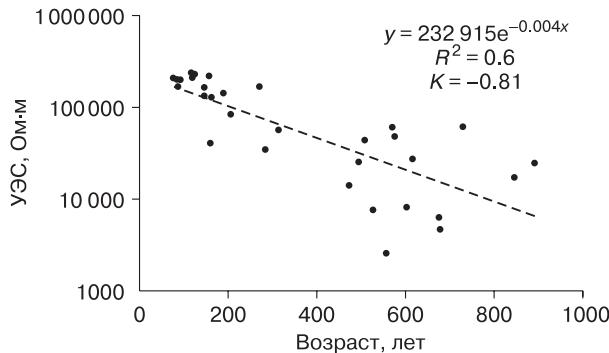


Рис. 4. Корреляционная связь возраста каменного глетчера и его удельного электрического сопротивления (УЭС) на глубине 10 м.

расположенных в отрогах хребта Илейского Алатау, так как они развивались в одинаковых геокриологических условиях.

Этим примером показано, что при изучении строения каменных глетчеров методами геоэлектрики для относительной оценки возраста отдельных генераций КГ и мерзлотного состояния ядра совместно с анализом УЭС необходимо использовать такой признак, как размер талломов лишайника *Rhizocarpon* sp. На участках наиболее старых генераций КГ, где развиты крупные талломы *Rhizocarpon* sp., следует ожидать относительно низкие значения УЭС каменно-ледяного ядра (первые десятки килоом на метр) либо отсутствие высокомоментных аномалий, что означает полное вытаивание льда. И наоборот, на относительно поздние генерации КГ указывают редкие мелкие талломы лишайника *Rhizocarpon* sp. (или их отсутствие) в совокупности с аномально высоким УЭС каменно-ледяного ядра.

Аналогичные закономерности были отмечены авторами и на прислоновых каменных глетчерах Горного Алтая [Лапковская и др., 2016].

Учет типа растительности при интерпретации высокомоментных аномалий в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород

Критериями выделения островов ММП на фоне талых пород являются локальные аномалии повышенного УЭС. В то же время повышение сопротивления пород может быть связано со сменой литологического состава рыхлых отложений с пелитового на псаммитовый, с увеличением содержания валунов и гальки в песках или с уменьшением влажности пород. В этом случае возникает неоднозначность геологической интерпретации данных геоэлектрики. Для повышения качества истолкования природы электрических аномалий рекомендуется использовать фитоиндикацию гео-

криологических условий. Примеры использования такого подхода к анализу геофизических данных приведены ниже.

В пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании [Оленченко, Кондратьев, 2017], была осуществлена интерпретация данных электротомографии с учетом ландшафтных индикационных признаков. Согласно данным термометрии, здесь развиты острова высокотемпературных (около -0.1°C) многолетнемерзлых пород. В результате геофизических исследований выявлена локальная аномалия высокого УЭС, границы которой контролируются зарослями *Betula fruticosa* (рис. 5, б). На космоснимке они выглядят как участки густой растительности на фоне отдельно стоящих деревьев бересклета плосколистной *Betula platyphylla* (см. рис. 5, а). На разрезе УЭС хорошо заметно, что в слое ММП на участках густой растительности электросопротивление пород повышается с 85 до 180 Ом·м (см. рис. 5, а). Согласно приближенной зависимости УЭС мерзлых пород с массивной криогенной структурой от состава и температуры [Боголюбов и др., 1987], температура мерзлых суглинков понижается от -0.1 до -0.5°C .

Наличие кустарниковой бересклеты позволило однозначно интерпретировать высокомоментную аномалию как ММП, а не как скопление галечника руслоевой фации аллювия.

В другом случае при исследованиях геокриологического строения разреза на участках образования суффозионных воронок в переделах бестяхской террасы (Якутия) было установлено, что высокомоментные аномалии в разрезе наблюдаются под участками произрастания лиственницы Каяндеры (даурская) (*Larix cajanderi*). Такие аномалии повышенного УЭС интерпретируются как ММП с пониженной температурой.

Фрагмент геоэлектрического разреза бестяхской террасы на участке Улахан-Тарын по результатам 2D инверсии [Оленченко и др., 2017] представлен на рис. 6, а. Здесь под участками произрастания лиственницы УЭС мерзлых песков достигает 5000 Ом·м, что по графикам приближенной зависимости УЭС от температуры пород соответствует температуре -0.75°C . Там, где произрастает сосна обыкновенная, УЭС понижается до 2000 Ом·м, что соответствует температуре -0.25°C (см. рис. 6, б). Учитывая однородный литологический состав верхней части разреза террасы, можно утверждать, что изменения УЭС мерзлого горизонта связаны именно с температурой.

Л.А. Гагариным дополнительно было отмечено, что термосуффозионное оврагообразование значительно меняет ландшафтную обстановку: изменяется рельеф, мерзлотно-гидрогеологические условия и, как следствие, со временем начинается

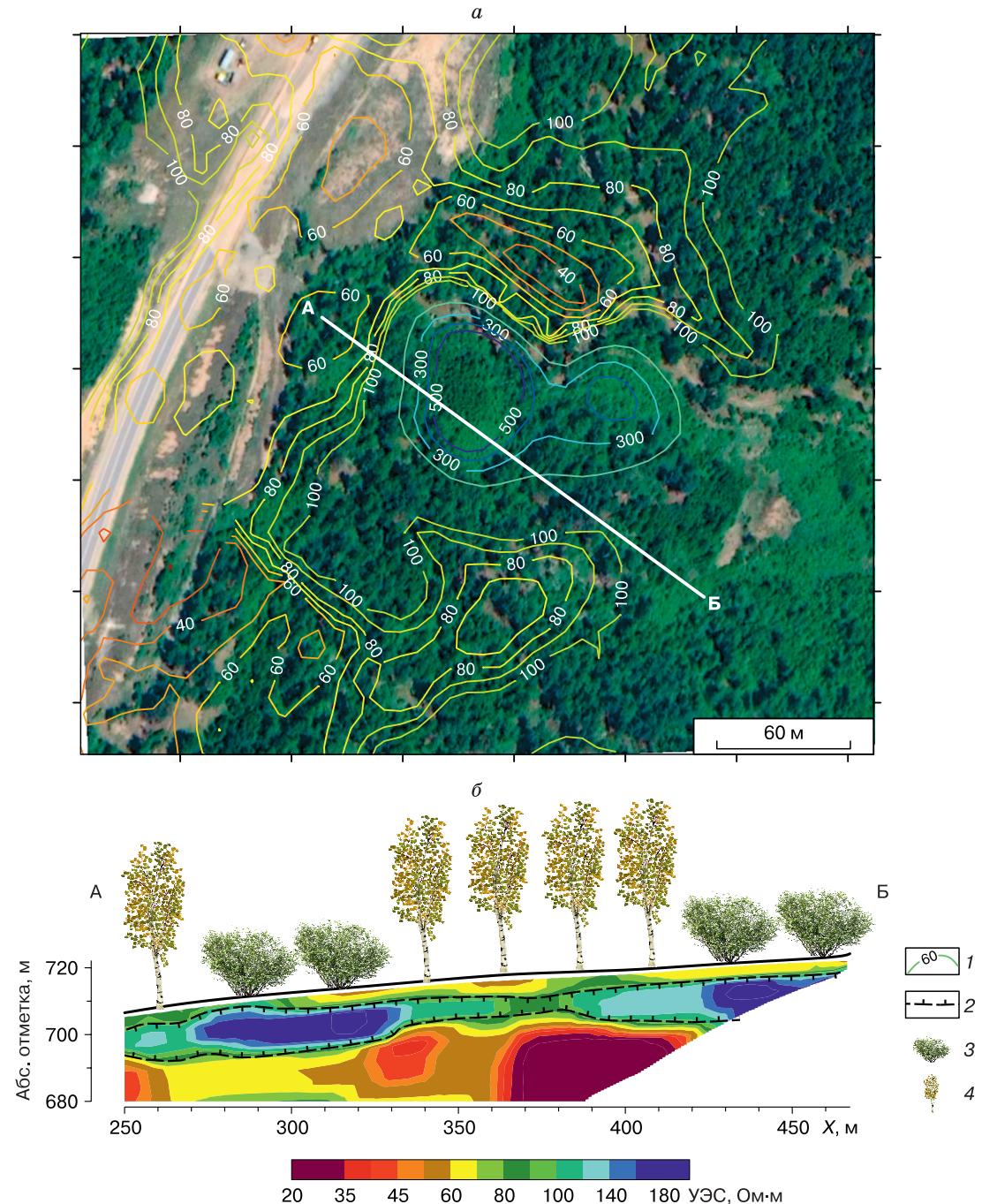


Рис. 5. Распределение УЭС пород на глубине 7 м по результатам площадных исследований и 3D инверсии (а), геоэлектрический разрез по линии А–Б по результатам 2D инверсии (б).

1 – изолинии УЭС; 2 – граница ММП; 3 – заросли кустарниковой бересклеты (*Betula fruticosa*); 4 – бересклет плосколистный (*Betula platyphylla*).

сукцессия растительности [Оленченко и др., 2017]. Так, в зоне активного развития термосуффозионных воронок произрастает редкий сосновый лес, а на участках старых балок – преимущественно лиственница, мох, кочкарник. Аномалии повыш-

шенного УЭС под такими криофильными сообществами как кустарниковая бересклет (ерник) и лиственница Каяндера (даурская), следует интерпретировать как многолетнемерзлые породы с пониженной температурой.

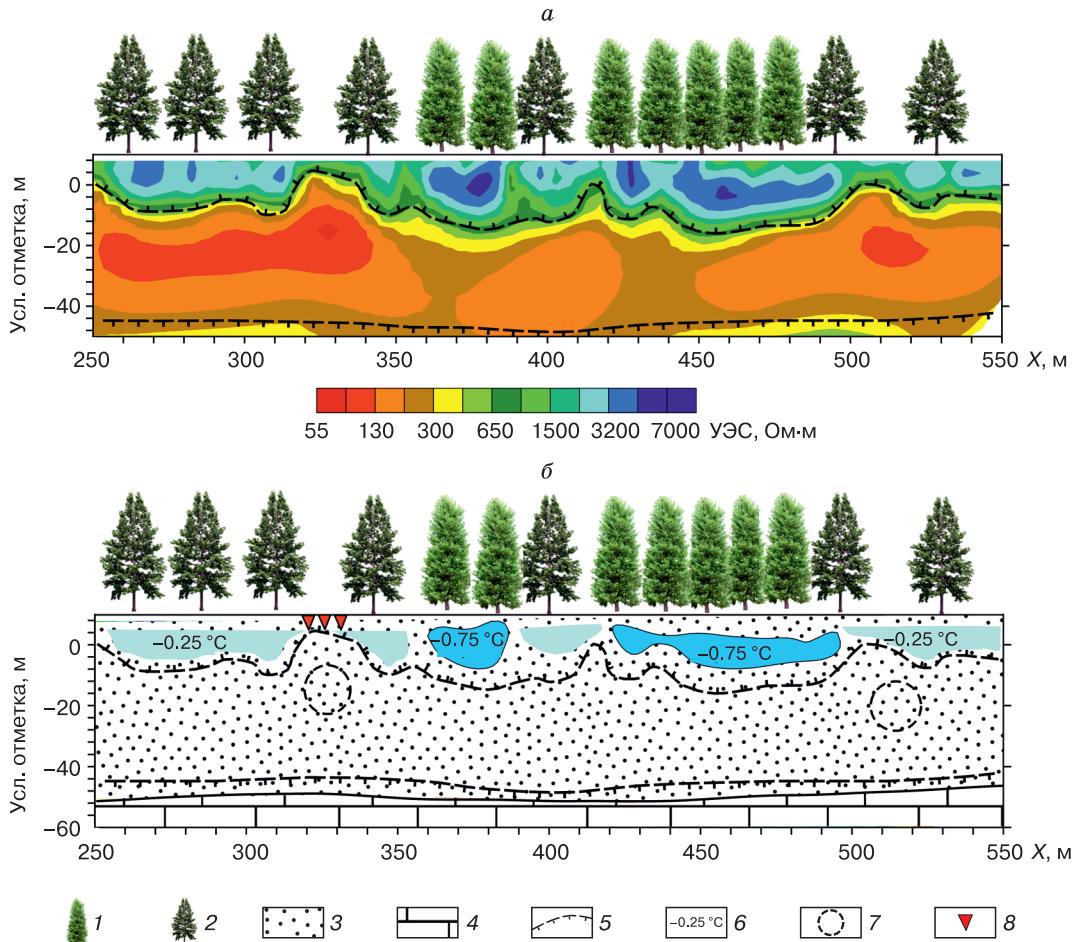


Рис. 6. Фрагмент геоэлектрического разреза бестяхской террасы на участке Улахан-Тарын (а) и его интерпретация (б).

1 – лиственница даурская; 2 – сосна; 3 – песок; 4 – карбонатные породы; 5 – граница ММП; 6 – температура пород; 7 – каналы фильтрации подземных вод; 8 – суффозионные воронки.

Выделение таликов по данным геоэлектрики и фитоиндикации

Обычно талики выделяются по аномалиям пониженного УЭС на фоне высокоомных мерзлых пород. Однако понижение сопротивления пород может быть вызвано не только переходом из мерзлого состояния в талое, но и сменой литологического состава рыхлых отложений с псаммитового на пелитовый, дроблением и милонитизацией в зонах разломов либо пиритизацией или графитизацией лиофилизованных осадочных пород. Поэтому для выявления аномалий низкого УЭС, связанных с таликами, необходимо привлекать дополнительную информацию, такую как фитопримечания талых пород.

Например, исследования методами скважинной термометрии и ЭТ в пределах наледной поляны р. Анмангында в Магаданской области показа-

ли (рис. 7, а), что ММП в окрестностях термометрической скважины залегают с глубины 8.5 м (см. рис. 7, в) и имеют высокую отрицательную среднегодовую температуру около -0.3°C , при этом УЭС мерзлых пород варьируется в пределах 3500–4600 $\Omega\cdot\text{м}$ (см. рис. 7, г). Такая высокая температура ММП и относительно низкое УЭС объясняются отепляющим влиянием надмерзлотных вод аллювиальных отложений [Оленченко и др., 2023]. Вдали, где нет отепляющего действия подземных вод, УЭС ММП возрастает до 16 000 $\Omega\cdot\text{м}$.

Талые аллювиальные отложения в верхней части разреза имеют УЭС от 1800 до 5000 $\Omega\cdot\text{м}$ в зависимости от влажности и контрастно выделяются на фоне низкоомных подстилающих песчано-глинистых сланцев. В коренных породах установлены области низкого УЭС 50–300 $\Omega\cdot\text{м}$ на фоне 500–700 $\Omega\cdot\text{м}$ (см. рис. 7, г). Такие анома-

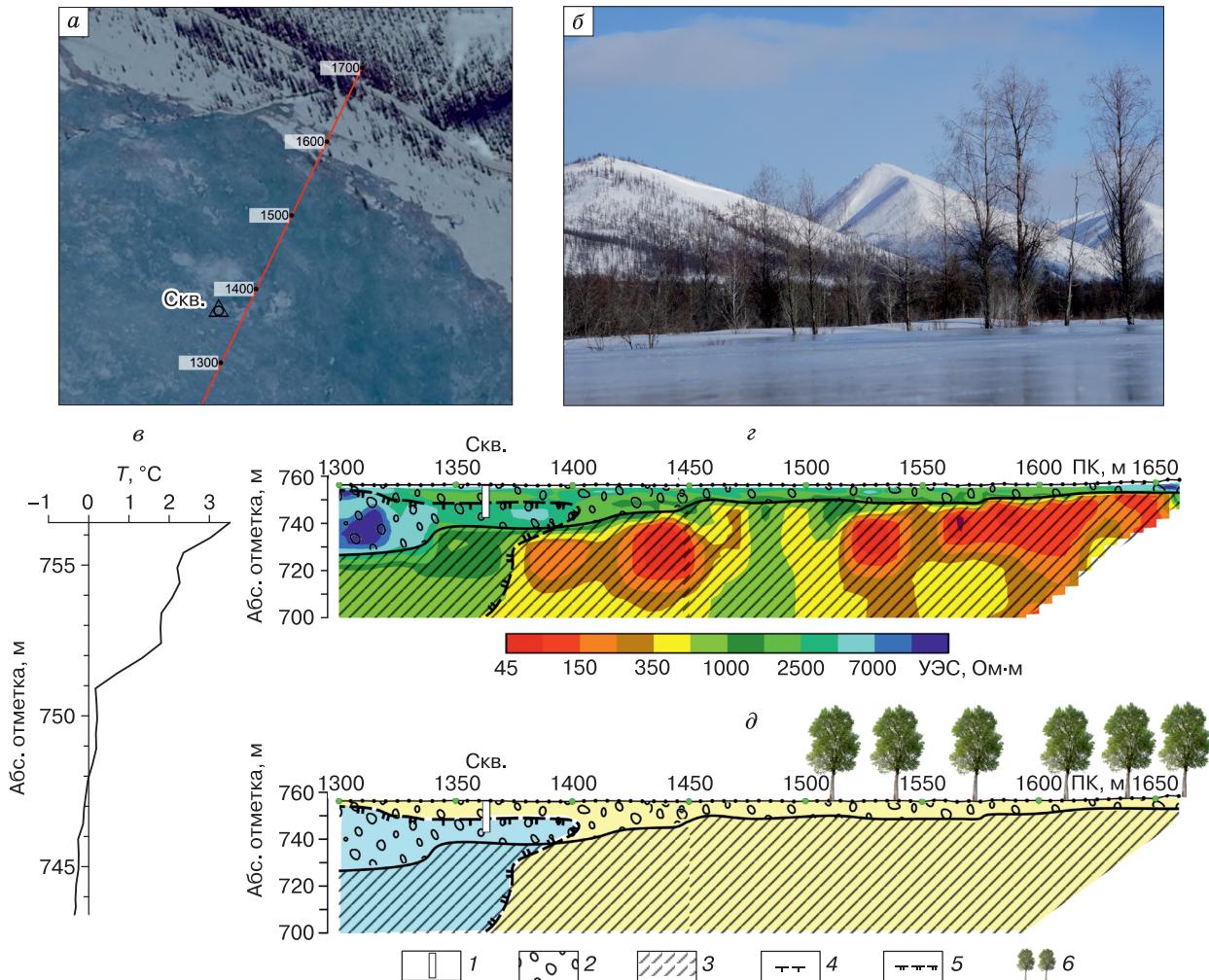


Рис. 7. Схема расположения профиля через долину реки (а), чозении у правого берега реки (б), график температуры пород в скважине (в), геоэлектрический разрез (г) и его интерпретация (д).

1 – скважина; 2 – аллювий; 3 – сланцы; 4 – граница ММП по термометрии; 5 – граница ММП по данным ЭТ; 6 – чозении и тополя.

лии можно интерпретировать двояко – как талики и как зоны пиритизации коренных пород.

Однако авторами подмечено, что эти аномалии пространственно совпадают с участками прорастания чозений и тополей (см. рис. 7, б, д), которые являются индикаторами обводненных таликов в криолитозоне. Следовательно, установленные по данным ЭТ области низкого сопротивления связаны с талыми породами.

В долине р. Нелканжя (Магаданская обл.) один из георадарных профилей проходил по наледи и пересекал остров с чозениями. На радарограмме (рис. 8, а) отчетливо выделяется отражающая граница на подошве наледного льда (Л) на глубине 1.0–1.5 м, а также граница сезонного про-

мерзания (С) на глубине около 4 м. Здесь для пересчета временного разреза в глубинный принято значение относительной диэлектрической проницаемости, равное 3.2, типичное для льда.

Хорошо видно, что под чозениевой рощей отсутствует граница С, что объясняется отепляющим влиянием в зоне разгрузки подземных вод. Еще один канал субгляциальной разгрузки подземных вод выделяется на радарограмме на пикете 320 м. В данном случае фитоиндикатор чозения указывает на талик в интервале профиля 250–280 м и позволяет однозначно интерпретировать отражающую границу на радарограмме на глубине 3.5–4.0 м как подошву слоя сезонного промерзания, так как эта граница отсутствует в талике.

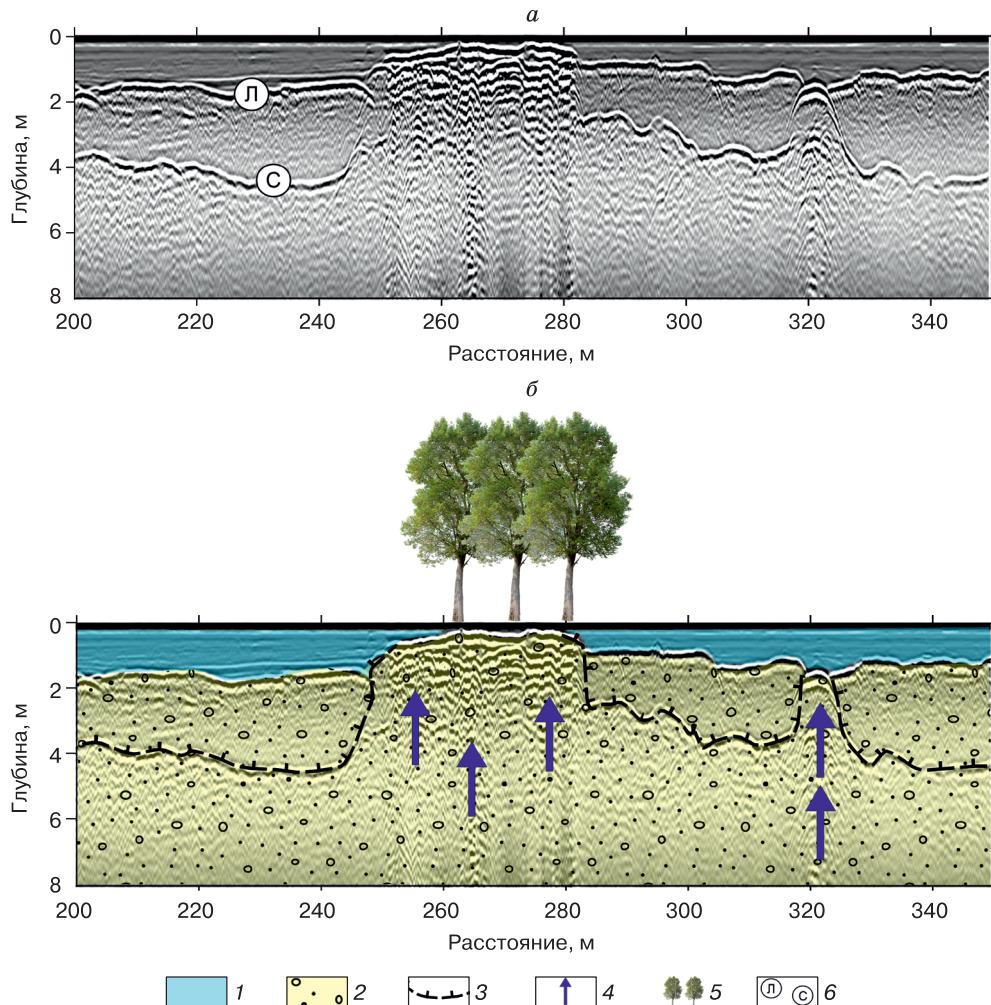


Рис. 8. Радарограмма по профилю через наледь р. Нелканджа (а) и ее интерпретация (б).

1 – лед; 2 – аллювий; 3 – граница сезонного промерзания; 4 – каналы разгрузки подземных вод; 5 – чозении; 6 – отражающая граница от подошвы льда (Л) и от подошвы сезонномерзлого слоя (С).

Геоэлектрические закономерности размещения муравейников в криолитозоне

Ранее на основе результатов полевых исследований было показано, что в условиях криолитозоны скопления крупных гнезд муравьев *F. aquilonia* и *F. exsecta* тяготеют к участкам с пониженным УЭС пород, интерпретируемых как области с глубоко залегающей кровлей ММП или талики [Оленченко, 2014]. Для подтверждения этих выводов было проведено численное моделирование электрического поля для модели разреза с глубиной кровли ММП переменной мощности и таликом.

На основе схемы размещения муравейников в криолитозоне [Берман, 2007] была составлена двумерная геоэлектрическая модель (рис. 9, а).

Талым породам присвоено УЭС в 100 Ом·м, а мерзлым – 500 Ом·м. С помощью программы ZondRes2d была рассчитана прямая задача для измерений трехэлектродной прямой и встречной установками и получен разрез кажущегося УЭС (см. рис. 9, б). С помощью программы Res2DInv была выполнена инверсия и построен восстановленный геоэлектрический разрез УЭС (см. рис. 9, в).

Из рис. 9, в следует, что с учетом купольных гнезд муравьев *F. exsecta* аномалии низкого УЭС на разрезе сопротивлений нужно интерпретировать как таликовые зоны, а не как смену литологического состава пород с псаммитового на пелитовый. Таким образом, благодаря биоиндикации снижается неоднозначность интерпретации данных геоэлектрики.

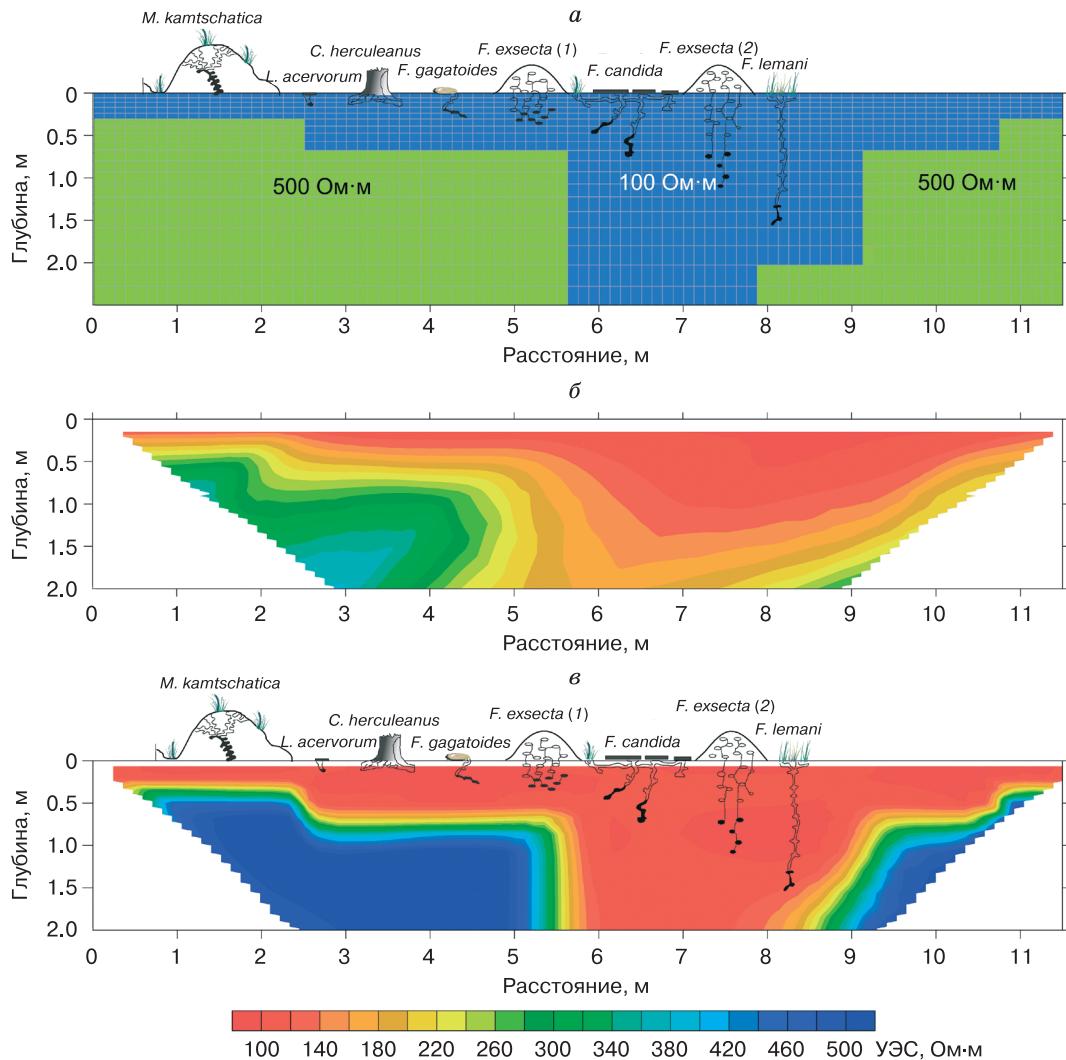


Рис. 9. Двумерная геоэлектрическая модель разреза под муравейниками в криолитозоне по [Берман, 2007] (а), распределение кажущегося УЭС (б) и восстановленная модель (в).

ВЫВОДЫ

Из обобщения литературных данных и наблюдений авторов следует, что при исследовании криолитозоны геофизическими методами в процессе интерпретации необходимо использовать сведения о растительности и обращать внимание на растения-индикаторы геокриологических условий.

При изучении каменных глетчеров низкое УЭС отложений и крупные пятна лишайников *Rhizocarpon* sp. указывают на большой возраст отдельной генерации. И наоборот, очень высокое УЭС ядра и отсутствие лишайников и растительности на поверхности каменного глетчера являются признаком молодых генераций.

При работе в горно-таежной местности следует обращать внимание на сочетание аномалий очень высокого УЭС и криофильных сообществ – лиственница, карликовая или кустарниковая береска,

моховой покров. В пределах таких участков развиты неглубокозалегающие мерзлые породы с низкой температурой и(или) высокой льдистостью.

В долинах рек Забайкалья, Якутии, Северо-Востока России и Горного Алтая заросли чозении и тополей указывают на интенсивный водообмен в породах и их талое состояние. Эти фитоиндикаторы дают основание однозначно интерпретировать аномалии низкого УЭС в пределах границ произрастания таких деревьев, как талики.

Фитоиндикация геокриологических условий полезна и при интерпретации данных георадиолокации, когда необходимо установить природу отражающих границ или оценить состояние разреза по волновой картине. На участках произрастания чозении и тополей в речных долинах на радарограммах отсутствует отражающая граница от подошвы слоя сезонного промерзания. В условиях гор-

ной криолитозоны муравейники локализуются в пределах зоны тектонического нарушения с прерывистым типом распространения ММП. Отличительной особенностью геоэлектрического разреза в области колонии муравьев является повышение мощности слоя низкого УЭС в приповерхностной части разреза. Возможно, этот факт связан с возрастанием мощности экзогенной трещиноватости в зоне дробления, при этом хорошо дренирующие трещиноватые породы являются благоприятным местом для устройства гнезд муравьев.

Учет ландшафтных индикаторов геокриологических условий дает возможность повысить однозначность истолкования результатов геофизических исследований криолитозоны методами геоэлектрики.

Благодарности. Интерпретация и анализ данных выполнены при поддержке проекта Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-2024 “Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент”.

Исследования на территории Магаданской области выполнены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата”.

Литература

- Берман Д.И.** Экология животных Северо-Восточной Азии и реконструкция плейстоценовых ландшафтов Берингии: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2007, 56 с.
- Боголюбов А.Н.** Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке / А.Н. Боголюбов, Н.П. Боголюбова, Е.Я. Мозганова. ПНИИС. М., Стройиздат, 1987, 86 с.
- Гагарин Л.А., Оленченко В.В., Павлова Н.А.** О причинах затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены в Центральной Якутии // Геоэкология. Инж. геология, гидрогеология, геокриология, 2023, № 5, с. 28–42.
- Галанин А.А.** Лихенометрический метод изучения криогенных процессов // Наука и техника в Якутии, 2012, № 1 (22), с. 8–15.
- Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И.** Новые данные о внутреннем строении, гидрологическом режиме и реологии каменных глетчеров Северного Тянь-Шаня – источников катастрофических ледово-грязекаменных селей // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы XXI совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2015, с. 369–375.
- Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И. и др.** Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 58–74.
- Дьякова Г.С., Гореявчева А.А., Останин О.В. и др.** Геофизические исследования внутреннего строения гляциаль-но-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая // Лед и снег, 2020, т. 60, № 1, с. 109–120.
- Ермохина К.А.** Фитоиндикация экзогенных процессов в тундрах Центрального Ямала: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009, 25 с.
- Корсун О.В.** О локализации регионального памятника природы “Муравейники Арахлея” (Читинская область) // Материалы Междунар. конф. “Природоохранное сотрудничество Читинской области (Российская Федерация) и автономного района Внутренняя Монголия (КНР) в трансграничных экологических регионах” (Чита, 29–31 окт. 2007 г.). Чита, Изд-во ЗабГГПУ, 2007, с. 190–193.
- Лапковская А.А., Оленченко В.В., Дьякова Г.С.** Геоэлектрическое строение каменного глетчера сукорского оползня обвала (Горный Алтай) // Интерэкско Гео-Сибирь, 2016, т. 2, № 2, с. 53–57.
- Марченко С.С.** Криолитозона Северного Тянь-Шаня: прошлое, настоящее, будущее. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2003, 106 с.
- Маслов А.Д.** Основы геокриологии / А.Д. Маслов, Г.Г. Осадчая, Н.В. Тумель, Н.А. Шполянская. Ухта, Ин-т управления, информации и бизнеса, 2005, 176 с.
- Михайлов В.М.** Пойменные талики Северо-Востока России: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2005, 42 с.
- Михайлов В.М.** Географические закономерности распространения пойменных таликов // Изв. РАН. Сер. геогр., 2014, № 1, с. 65–74.
- Немова Е.М., Александрова М.С.** Итоги интродукции древесных растений семейства Betulaceae в Главном ботаническом саду РАН за 50 лет // Бюл. Гл. бот. сада. М., Наука, 2001, вып. 181, с. 5–23.
- Оленченко В.В.** Муравейники как возможные биоиндикаторы таликовых зон // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 91–96.
- 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.
- Оленченко В.В., Кондратьев В.Г.** Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании // Вестн. Сев.-Вост. гос. ун-та, 2017, № 27, с. 116–119.
- Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянская А.А. и др.** Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, № 3, 0702.
- Поздняков Л.К.** Даурская лиственница. М., Наука, 1975, 298 с.
- Рекомендации** по геокриологической съемке и районированию равнинных территорий для размещения объектов нефтяной и газовой промышленности по стадиям проектирования / Под ред. В.В. Баулина, Ю.Т. Уваркина, Т.Ф. Ивановой, Л.А. Мейстер. ПНИИС. М., Стройиздат, 1984, 108 с.
- Beschel R.E.** A project to use lichens as indicators of climate and time // Arctic, 1957, vol. 10, p. 60.
- Gorbunov A., Titkov S., Polyakov V.** Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien-Shan and the Djungar Alatau // Permafro. Perigl. Process., 1992, vol. 3, p. 29–39.
- Ishikawa M.** Spatial Mountain permafrost modelling in the Daisetsu Mountains, northern Japan. In: Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, July 21–25, 2003). Zurich, Swets & Zeitlinger Lisse, 2003, vol. 1, p. 473–478.
- Kneisel C.** Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging // Geomorphology, 2006, vol. 80, p. 32–44.
- Leopold M., Williams M., Caine N. et al.** Internal Structure of the Green Lake 5 Rock Glacier, Colorado Front Range, USA // Permafro. Perigl. Process., 2011, vol. 22, No. 2, p. 107–119.

Obu J., Westermann S., Kääb A., Bartsch A. Ground Temperature Map, 2000–2016, Northern Hemisphere Permafrost. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven. PANGAEA, 2018. –

<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.888600>

Stiegler C., Rode M., Sass O., Otto J. An undercooled scree slope detected by geophysical investigations in sporadic permafrost below 1000 m ASL, central Austria // Permafro. Perigl. Process., 2014, vol. 25, No. 3, p. 194–207.

References

- Berman D.I. Ekologiya zhivotnyh severo-vostochnoj Azii i rekonstrukciya pleistocenovyh landshaftov Beringii [Animal ecology of Northeast Asia and reconstruction of the Pleistocene landscapes of Beringia]. Abstract of the dissertations for the degree of Doctor of biological sciences. Moscow, 2007, 56 p. (in Russian).
- Bogolyubov A.N., Bogolyubova N.P., Mozganova E.Ya. Rekomendacii po kompleksirovaniyu geofizicheskikh metodov pri merzlotnoj syomke [Recommendations for the integration of geophysical methods in permafrost surveys]. PNIIIS. Moscow, Stroyizdat, 1987, 86 p. (in Russian).
- Gagarin L.A., Olenchenko V.V., Pavlova N.A. Causes of thermal suffusion attenuation on the Bestyakh terrace of the Lena River, central Yakutia. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology], 2023, No. 5, p. 28–42.
- Galatin A.A., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I. New data on the internal structure, hydrological regime and rheology of rock glaciers of the Northern Tien-Shan, the sources of catastrophic glacial debris flows. In: Fundamental and Applied Issues in Geocryology: Proc. of the 21st Conf. on Ground Waters of Siberia and the Far East. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2015, p. 369–375 (in Russian).
- Galatin A.A., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I., Severskiy E.V., Galanina A.A. Highly dynamic rock glaciers of Tien Shan. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 4, p. 48–63.
- Galatin A.A. Lichenometric method for studying cryogenic processes. Nauka i tekhnika Yakutii [Science and Technology in Yakutia], 2012, No. 1 (22), p. 8–15.
- Dyakova G.S., Goreyavcheva A.A., Ostanin O.V., Olenchenko V.V., Biryukov R.Y. Geophysical studies of the internal structure of glacial-permafrost stone formations of the Central Altai. Led i Sneg [Ice and Snow], 2020, vol. 60, No. 1, p. 109–120.
- Ermohina K.A. Fitoindikaciya ekzogennych processov v tundrah Centralnogo Yamala [Phytoindication of exogenous processes in the tundra of Central Yamal]. Abstract of the dissertations for the degree of Cand. of geographical science. Moscow, 2009, 25 p. (in Russian).
- Korsun O.V. On localization of the regional natural preserve anthills of Arakhley (Chita Region). In: Proc. of the Int. Conf. "Nature Protection Cooperation Activities in Chita Region (Russian Federation) and of the autonomous district Inner Mongolia (China) in transborder ecological regions" (Chita, October 29–31, 2007). Chita, Trans-Baikal State Pedagogical University, 2007, p. 190–193 (in Russian).
- Lapkovskaya A.A., Olenchenko V.V., Dyakova G.S. The geo-electrical structure of rock glacier Sukorsky landslide (Altai mountains). Interexpo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia], 2016, vol. 2, No. 2, p. 53–57.
- Marchenko S.S. Permafrost zone of the Northern Tien-Shan: past, present, and future. Yakutsk, 2003, IMZ SO RAN, 106 p. (in Russian).
- Maslov A.D., Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Shpolyanskaya N.A. Osnovy geokriologii [Fundamentals of geocryology]. Ukhta, Institute of Management, Information and Business, 2005, 176 p. (in Russian).
- Mikhailov V.M. Poimennye taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain taliks of the North-East of Russia]. Abstract of the dissertations for the degree of Doctor of geographical science. Yakutsk, 2005, 42 p. (in Russian).
- Mikhailov V.M. Geographical regularities of distribution of floodplain taliks. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography series], 2014, No. 1, p. 65–74 (in Russian).
- Nemova E.M., Aleksandrova E.S. The results of the introduction of woody plants of the Betulaceae in the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences for 50 years. Biulleten Glavnogo botanicheskogo sada [Bulletin of the main botanical garden. Issue 181]. Moscow, Nauka, 2001, p. 5–23 (in Russian).
- Olenchenko V.V. Anthills as possible bioindicators of talik zones. Earth's Cryosphere, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 81–85.
- Olenchenko V.V., Gagarin L.A., Khristoforov I.I., Kolesnikov A.B., Efremov V.S. The structure of a site with thermosufusion processes within Bestyakh terrace of the Lena River, according to geophysical data. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 5, p. 14–23.
- Olenchenko V.V., Kondratiev V.G. Geophysical research on the area deformations road, built on frozen ground. Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Northeastern State University], 2017, No. 27, p. 116–119.
- Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlyanskova A.A., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Nesterova N.V., Khristoforov I.I. Geophysical features of sources of giant aufeis on the Anmangynda river (Magadan region). Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tectonophysics], 2023, vol. 14, No. 3, 0702. – <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>
- Pozdnyakov L.K. Daurskaya listvennica [Daurian Larch]. Moscow, Nauka, 1975, 298 p. (in Russian).
- Recomendacii po geokriologicheskoy syemke i rayonirovaniyu ravninnnyh territorii dlya razmeshcheniya obektov neftyanoi i gazovoi promyshlennosti po stadiym proektirovaniya [Recommendations on geocryological survey and zoning of flat areas for the placement of oil and gas industry facilities at design stages]. V.V. Baulin, Yu.T. Uvarkin, T.F. Ivanova, L.A. Meister (eds.). PNIIIS. Moscow, Stroyizdat, 1984, 108 p. (in Russian).
- Beschel R.E. A project to use lichens as indicators of climate and time. Arctic, 1957, vol. 10, p. 60.
- Gorbunov A., Titkov S., Polyakov V. Dynamics of rock glaciers of the Northern Tien-Shan and the Djungar Alatau. Permafro. Perigl. Process., 1992, vol. 3, p. 29–39.
- Ishikawa M. Spatial Mountain permafrost modelling in the Daisetsu Mountains, northern Japan. In: Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, July 21–25, 2003). Zurich, Swets & Zeitlinger Lisse, 2003, vol. 1, p. 473–478.
- Kneisel C. Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging. Geomorphology, 2006, vol. 80, p. 32–44.
- Leopold M., Williams M., Caine N., Voelkel J., Dethier D. Internal Structure of the Green Lake 5 Rock Glacier, Colorado Front Range, USA. Permafro. Perigl. Process., 2011, vol. 22, No. 2, p. 107–119.
- Obu J., Westermann S., Kääb A., Bartsch A. Ground Temperature Map, 2000–2016, Northern Hemisphere Permafrost. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven. PANGAEA, 2018. –
- <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.888600>
- Stiegler C., Rode M., Sass O., Otto J. An undercooled scree slope detected by geophysical investigations in sporadic permafrost below 1000 m ASL, central Austria. Permafro. Perigl. Process., 2014, vol. 25, No. 3, p. 194–207.

Поступила в редакцию 18 апреля 2024 г.,
после доработки – 11 июля 2024 г.,
принята к публикации 29 сентября 2024 г.