

Изучение анизотропии мерзлых пород на полигоне Хановой (Республика Коми) по данным радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником и электротомографии*

Н. Ю. Бобров¹, А. А. Шлыков¹, А. К. Сараев¹, В. С. Исаев², А. И. Балахнин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Научный центр изучения Арктики, Российская Федерация, 629008, Салехард, ул. Республики, 20

Для цитирования: Бобров, Н. Ю., Шлыков, А. А., Сараев, А. К., Исаев, В. С., Балахнин, А. И. (2023). Изучение анизотропии мерзлых пород на полигоне Хановой (Республика Коми) по данным радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником и электротомографии. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (4), 696–716. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.405>

Представлены результаты совместной инверсии данных радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К) и электротомографии (ЭТ), полученных на мерзлотном полигоне Хановой под Воркутой. Геологический разрез в районе работ сложен четвертичными водно-ледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными отложениями мощностью до 60 м, перекрывающими толщу песчаников, алевролитов и аргиллитов пермского возраста. Работы РМТ-К проводились с использованием в качестве источника заземленной электрической линии длиной 480 м в диапазоне частот 1–1000 кГц. Выполнено сравнение результатов различных вариантов инверсии: 1) изотропной одномерной (1D) инверсии данных РМТ-К; 2) изотропной двумерной (2D) инверсии отдельно данных РМТ-К и ЭТ; 3) совместной анизотропной 1D инверсии данных РМТ-К и ЭТ. По результатам совместной анизотропной инверсии данных РМТ-К в дальней и промежуточной зонах источника и данных ЭТ выявлена связанная с горизонтальной слоистостью вертикальная анизотропия мерзлых четвертичных глинистых отложений, залегающих в интервале глубин от 2 до 15–20 м, и определены ее параметры: горизонтальное и вертикальное удельное сопротивление и коэффициент анизотропии. На геоэлектрическом разрезе, полученном по данным ЭТ, мощность анизотропного слоя мерзлых глинистых отложений существенно завышена. Для средней части разреза в интервале глубин от 15–20 до 60–70 м, характерны относительно низкие значения удельного сопротивления (десятки омметров). Это согласуется с результатами предшествующих исследований, согласно которым верхняя часть толщи пермских отложений находится в талом состоянии и является трещиноватой и водонасыщенной. В основании геоэлектрического разреза по данным РМТ-К выявлен высокоомный слой (сотни омметров). Значительное увеличение удельного сопротивления пермских пород с глубиной подтверждается данными вертикальных электрических зондирований, выполненных ранее на Хановейской площади.

* Исследование проводилось при поддержке гранта РФФ № 21-47-04401 и Ресурсного центра «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, анизотропия электрических свойств, электротомография, радиоманнитотеллурические зондирования, контролируемый источник.

1. Введение

Анизотропия свойственна многим горным породам, имеющим слоистую структуру. Вертикальная анизотропия горизонтально-слоистой среды проявляется в том, что ее удельное электрическое сопротивление (УЭС) в направлении поперек прослоев (вертикальное УЭС, ρ_V) больше УЭС в направлении вдоль прослоев (горизонтальное УЭС, ρ_H). Количественной мерой анизотропии является коэффициент анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_V / \rho_H}$. В электроразведке УЭС, определяемое по данным методов постоянного тока (вертикального электрического зондирования — ВЭЗ, электротомографии — ЭТ), как правило, превышает УЭС, определяемое по данным индукционных методов (метода переходных процессов — МПП, частотного зондирования — ЧЗ) (Шевнин, 2012). Это связано с различной структурой электромагнитного поля при гальваническом и индуктивном возбуждении. Индукционная составляющая поля зависит от ρ_H , гальваническая составляющая в случае анизотропной среды определяется средним геометрическим значением поперечного и продольного УЭС $\rho_m = \sqrt{\rho_V \rho_H}$ (Maillet, 1947; Ваньян, 1965; Краев, 1965). Если проводить инверсию данных методов постоянного тока без учета анизотропии, то мощность анизотропных слоев будет завышена (теоретически — в λ раз), что неоднократно отмечалось в работах разных авторов (Иванов и др., 2011; Шевнин и др., 2013; Demirci et al., 2017).

Вертикальная анизотропия широко распространена в мерзлых породах, особенно в тонкодисперсных, где поровая влага содержится преимущественно в виде пленок связанной воды на поверхности минеральных зерен. При этом полное вымерзание влаги практически никогда не происходит при относительно небольших отрицательных температурах (несколько градусов ниже нуля), характерных для большинства мерзлых толщ. Промерзание в поле силы тяжести при наличии вертикального градиента температуры сопровождается миграцией незамерзшей влаги к фронту промерзания и образованием горизонтальных шлиров льда и слоистых криотекстур (Ершов, 2002). Чередование прослоев льда-изолятора и проводящей исходной породы приводит к образованию макро-анизотропной среды. Это свойство мерзлых пород важно учитывать при их изучении методами электроразведки. На основе определения параметров анизотропии созданы подходы к определению льдистости, важного параметра мерзлых толщ, учет которого необходим при проведении строительных работ в криолитозоне (Рекомендации..., 1989; Фролов, 1998).

Для корректной интерпретации данных в случае вертикально анизотропных разрезов нужно комплексировать методы постоянного и переменного тока. Чаще всего предлагается сочетать методы ВЭЗ и ЭТ с МПП (Jupp and Vozoff, 1977; Raiche et al., 1985; Иванов и др., 2011). Еще одним индукционным методом, нашедшим широкое применение в инженерной геофизике, является метод радиоманнитотеллурических (РМТ) зондирований. Разработаны алгоритмы совместной инверсии данных РМТ и ЭТ, продемонстрировавшие свою эффективность для повышения

достоверности получаемых моделей (Candansayar and Tezkan, 2008; Kalscheuer et al., 2010; Каминский и др., 2015). Расширенными возможностями по выявлению анизотропии обладает метод радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К) — заземленной электрической линией (кабелем конечной длины) (Сараев и др., 2014; Saraev et al., 2017). Электромагнитное поле такого источника в промежуточной зоне содержит как индукционную, так и гальваническую составляющие, что позволяет при инверсии сузить пространство эквивалентных моделей и определить коэффициент анизотропии разреза (Shlykov and Saraev, 2015; Shlykov et al., 2019). В дальней зоне, где в поле данного источника остается только индукционная составляющая, эффективна совместная инверсия данных РМТ-К и ЭТ (Shlykov et al., 2021). Алгоритм совместной инверсии реализован в программе CS1D для одномерной (1D) инверсии в дальней и промежуточной зонах контролируемого источника с учетом токов смещения (Шлыков, 2014).

Метод РМТ-К ранее показал свою эффективность и высокую производительность при работах в районах распространения многолетнемерзлых пород, в том числе в зимний период в сложных условиях заземления, когда может быть реализовано преимущество измерений электрического поля с использованием незаземленных (емкостных) приемных линий (Shlykov et al., 2020; Saraev et al., 2022). Для выяснения возможности изучения вертикальной анизотропии УЭС мерзлых пород при совместном использовании РМТ-К и ЭТ в сентябре 2022 г. был выполнен полевой эксперимент на мерзлотном полигоне Хановой кафедры геокриологии Московского государственного университета.

2. Участок работ

Учебно-научный полигон Хановой (Воркутинский район, Республика Коми) предоставляет большие возможности для сравнительных мерзловедческих и геолого-геофизических исследований. Полигон расположен между железнодорожной линией Котлас — Воркута и правым берегом р. Воркута рядом с железнодорожной станцией Хановой (рис. 1). Верхняя часть разреза на полигоне сложена четвертичными водно-ледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными отложениями, залегающими на коренных породах пермского возраста, представленных переслаивающимися песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Мощность многолетнемерзлых пород в районе полигона по результатам предшествующих работ оценивалась в диапазоне от 40 до 95 м (Котов и Гордеева, 2022). Криологические условия полигона характеризуются большим разнообразием. На участке интенсивно происходят процессы термокарста и речной термоэрозии, развиваются талики разных типов, что приводит к значительной неоднородности разреза по электрическим свойствам. На полигоне имеются термометрические скважины, пробуренные на основании результатов мерзлотной съемки по выделенным ключевым участкам. Данные инженерно-геологического бурения и термометрии используются для валидации геофизических данных (результатов электроразведки, радарных исследований и т. д.) (Tananaev et al., 2021; Котов и Гордеева, 2022; Rossi et al., 2022).

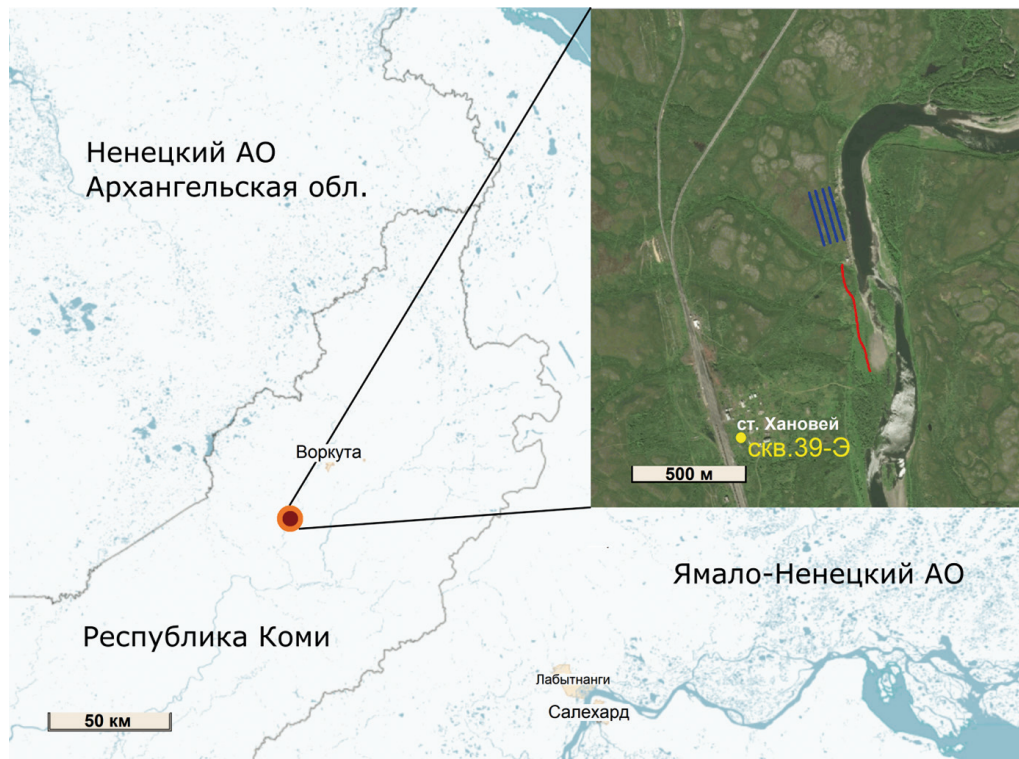


Рис. 1. Карта-схема расположения учебно-научного полигона Хановей. Доступно на: <https://www.openstreetmap.org>; врезка — <https://www.bing.com/maps> [Дата доступа 10.02.2023]. Красным цветом на врезке обозначено расположение генераторной линии РМТ-К, синим цветом — профили измерений. Желтой точкой обозначено положение водозаборной скважины 39-Э на станции Хановей

3. Используемые методы

3.1. Электротомография

Электротомография — современная разновидность метода сопротивлений, основанного на гальваническом возбуждении в земле постоянного или низкочастотного переменного электрического тока и измерении возникающей при этом разности потенциалов, которая зависит от электрических свойств среды. Изменяя расстояние между токовыми и приемными электродами — разнос — можно регулировать глубину исследования, осуществляя электрическое зондирование. Для проведения ЭТ используются многоэлектродные косы и многоканальная аппаратура (Dahlin, 2001; Бобачев и др., 2006). Каждый электрод может выполнять роль токового и приемного, коммутация электродов осуществляется программно. В результате инверсии данных ЭТ получают двумерный (2D) геоэлектрический разрез — распределение УЭС по профилю и по глубине. Глубина исследования при использовании стандартных кос достигает нескольких десятков метров. Имея сеть параллельных профилей, можно получать трехмерные (3D) изображения среды.

ЭТ широко применяется для решения разнообразных геотехнических и экологических задач (Loke et al., 2013), в том числе в районах распространения многолетнемерзлых пород (Kneisel et al., 2008; Hauck, 2013; Briggs et al., 2017). Электрические свойства мерзлых отложений являются индикатором их состояния. Как правило, при промерзании УЭС пород резко возрастает, что связано со скачкообразным уменьшением доли свободной воды. При оттаивании происходит обратный процесс. Однако, кроме температуры, УЭС зависит также от литологического состава пород и минерализации поровой влаги, а также от криотекстуры.

В сентябре 2019 г. на полигоне Хановой были выполнены измерения методом ЭТ по четырем профилям длиной 235 м, проложенным на первой береговой террасе на правом берегу р. Воркута (Rossi et al., 2022). Для измерений использовалась комбинация трехэлектродной и дипольной установок. По данным съемки была установлена значительная неоднородность участка по электрическим свойствам. Исходя из значений УЭС были определены вариации глубины активного слоя, выявлен талик в северо-западной части участка. Породы с УЭС 200–600 Ом·м были определены как мерзлые, по данным ЭТ их мощность в пределах участка оценивалась в диапазоне от 30 до 50 м. В то же время авторами было отмечено, что полностью полагаться на данные ЭТ для определения подошвы мерзлоты нельзя, поскольку разрешающая способность электроразведки уменьшается с глубиной, и в данном случае оценки находятся на пределе глубинности метода. Кроме того, УЭС мерзлых пород зависит от многих факторов.

Данные измерений с трехэлектродной установкой, представленные в статье (Rossi et al., 2022) и находящиеся в открытом репозитории, были использованы в настоящей работе для совместной инверсии с данными РМТ-К.

3.2. Радиомагнитотеллурические зондирования с контролируемым источником

Метод РМТ-К представляет собой современную высокочастотную модификацию метода ЧЗ, в основе которого лежит явление скин-эффекта, то есть зависимость глубины проникновения в землю электромагнитного поля от его частоты. Рабочий диапазон частот в методе РМТ-К составляет 1–1000 кГц. В качестве источника используется горизонтальный магнитный диполь (вертикальная петля) (Bastani, 2001) или горизонтальный электрический диполь (заземленный на концах кабель конечной длины) (Saraev et al., 2017). Использование электрического диполя предпочтительнее, поскольку данный источник поля обладает большим дальностью действия, позволяет создавать высокочастотное электромагнитное поле, и при этом имеется возможность помимо сигнала основной частоты измерять ее нечетные субгармоники, что значительно повышает производительность работ. Однако индуктивный источник — вертикальная петля — проще в развертывании и может иметь преимущество, если сложно организовать заземления. Глубина исследования методом РМТ-К достигает 200 м.

Схема измерений в методе РМТ-К с использованием горизонтального электрического диполя аналогична применяемой в широко известном методе CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotellurics) (Zonge and Hughes, 1991). Источник (генераторная линия) устанавливается вдоль направления профилей наблюдения.

Работы чаще всего проводят в дальней зоне источника, однако результаты могут быть получены и в промежуточной зоне. Измеряются компоненты поля E_x и H_y с определением импеданса Z_{xy} , при этом, как правило, приемная электрическая линия ориентируется по профилю. Для измерений электрического поля обычно используются бесконтактные приемные линии, хотя могут применяться и заземляемые линии. Применение бесконтактных приемных линий позволяет выполнять измерения в летнее время при плохих условиях для заземления и в зимнее время по снегу и льду, а также реализовать измерения импеданса в движении. При использовании двух ортогональных источников возможно проведение тензорных измерений и определение тензора импеданса (Saraev et al., 2023). Однако работы с применением этого варианта дороже и оправданы в районах со сложной геологией.

Для перекрытия диапазона частот от 1 до 1000 кГц обычно достаточно трех-четырёх основных частот генератора. Каждая из частот имеет до 9–12 измеряемых субгармоник, что позволяет с их помощью перекрыть интервал более декады. При обработке данных измерений значения кажущегося сопротивления (ρ_k), фазы импеданса (φ_Z), модуля и фазы типпера вычисляются так же, как в методе магнитотеллурических зондирований (Бердичевский и Дмитриев, 2009).

Измерения методом РМТ-К на полигоне Хановой проводились вдоль четырех профилей, по которым имелись данные ЭТ. Поскольку как ЭТ, так и РМТ-К исследования выполнялись в одно время года (в сентябре), можно ожидать, что температурные и геокриологические условия в верхней части разреза были близкими. Источником для метода РМТ-К была заземленная генераторная линия длиной 480 м. Генераторная линия располагалась на продолжении линий профилей так, чтобы измерения были выполнены на оси источника — в области, максимально чувствительной к вертикальной компоненте УЭС. Зондирования РМТ-К проводились с шагом 10 м, расстояние между точками измерения и ближайшим заземлением генераторной линии составляло от 95 до 340 м. При этом низкочастотная часть кривых зондирования соответствовала промежуточной зоне, а высокочастотная часть — дальней зоне источника.

Схема измерений показана на рис. 2. Они проводились с генератором GTS-1 и регистратором РМТ-5 (Saraev et al., 2017), измерялись только горизонтальная компонента электрического поля вдоль линий профилей (E_x) и ортогональная ей горизонтальная компонента магнитного поля (H_y), то есть использовался скалярный вариант. Для измерений в каждой точке поле возбуждалось последовательно на частотах 0,5, 5 и 50 кГц. Так как форма тока генератора GTS-1 представляет собой прямоугольный меандр, измерение нечетных субгармоник основной частоты позволило построить детальные кривые частотного зондирования в диапазоне 1–1000 кГц. Примеры автоспектров компоненты H_y электромагнитного поля генераторной линии в трех частотных диапазонах и соответствующие графики когерентности между компонентами E_x и H_y для пикета 100 м (ПК-100) на профиле 2 представлены на рис. 3. Можно видеть, что для каждой возбуждаемой частоты регистрируются 9 нечетных субгармоник (с 3-й по 19-ю), при этом когерентность для них превышает уровень 0,8, принимаемый нами за нижний предел для надежной оценки передаточных функций (импеданса и типпера). В диапазоне 100–1000 кГц этот уровень превышают также сигналы нескольких радиостанций, однако в данной работе для построения кривых зондирования они не использовались.

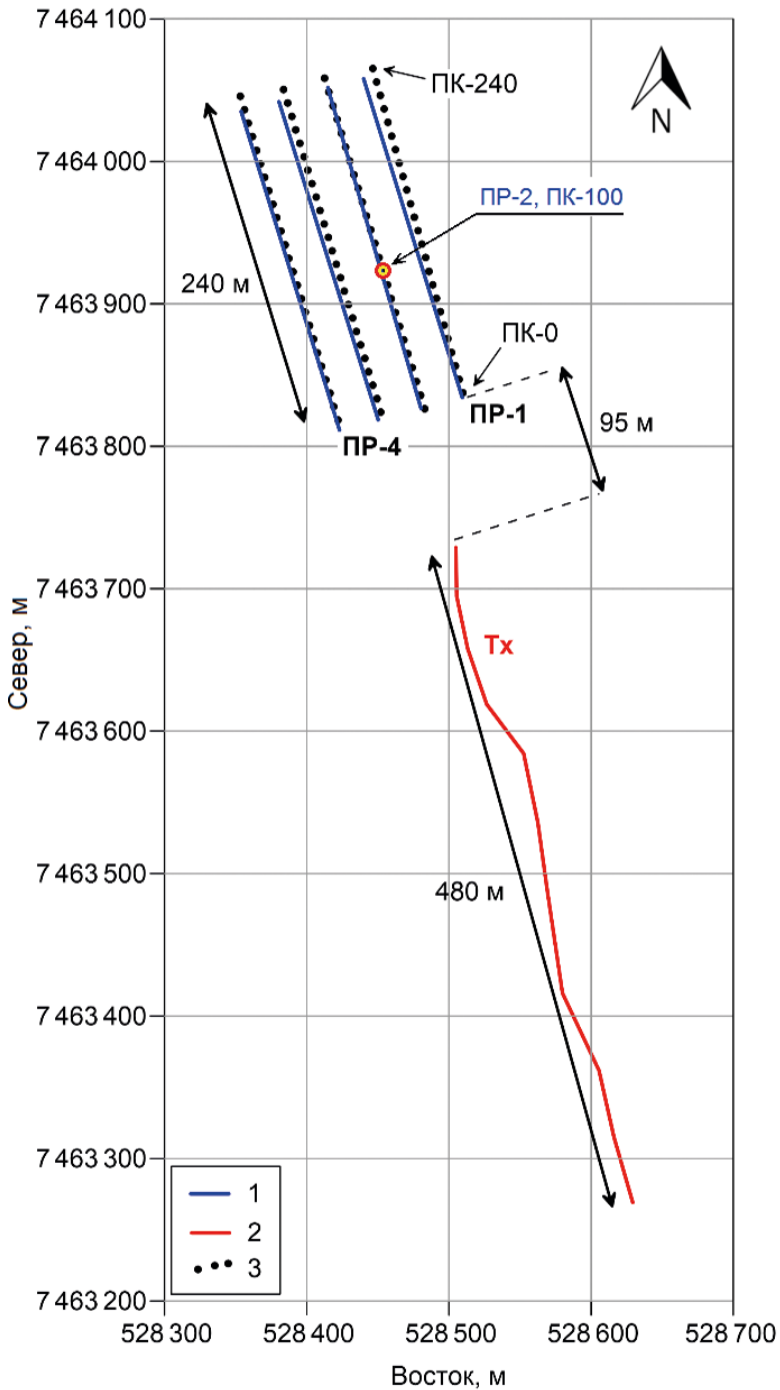


Рис. 2. Схема измерений на полигоне Хановей:

1 — профили ЭТ; 2 — генераторная линия РМТ-К; 3 — точки измерения методом РМТ-К. Желто-красным кружком выделен ПК-100 на профиле 2, для которого на рис. 3 и 5 приведены результаты измерений и инверсии данных

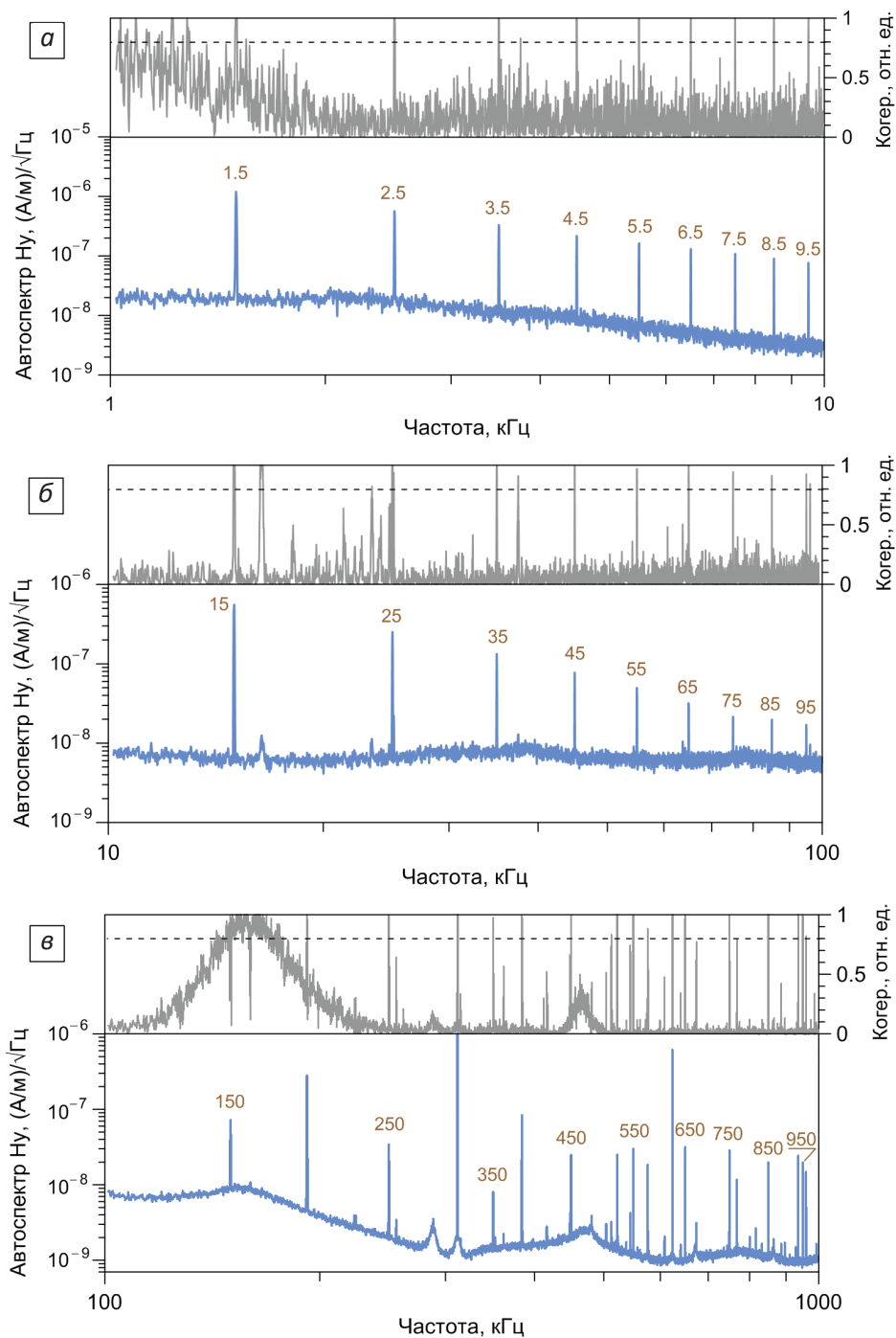


Рис. 3. Автоспектры компоненты H_y электромагнитного поля в диапазонах:
 а — 1–10 кГц, частота возбуждения 0.5 кГц; б — 10–100 кГц, частота возбуждения 5 кГц;
 в — 100–1000 кГц, частота возбуждения 50 кГц. Цифры на спектрах соответствуют частотам
 (кГц) нечетных субгармоник (3–19) основной частоты

4. Инверсия данных

Инверсия полученных данных выполнялась в различных вариантах:

1. Изотропная 2D инверсия данных ЭТ в программе ZondRes2D¹.
2. Изотропная 1D инверсия данных PMT-K с учетом промежуточной зоны в программе CS1D (Шлыков, 2014).
3. Изотропная 2D инверсия данных PMT-K с учетом промежуточной зоны в программе MARE2DEM (Key, 2016).
4. Анизотропная совместная 1D инверсия данных PMT-K с учетом промежуточной зоны и данных ЭТ в программе CS1D (Shlykov et al., 2021).

При совместной инверсии для каждой точки PMT-K из массива данных электротомографии выбирались те трехэлектродные измерения, центры приемных диполей которых располагались в непосредственной близости от нее (± 2 м). Были использованы данные, полученные как с прямой (AMN), так и с обратной (MNB) трехэлектродной установкой. Для получения итоговой кривой, подаваемой в инверсию, на каждом разносе бралось среднее геометрическое значение кажущегося сопротивления.

Для совместной инверсии использовался алгоритм Левенберга — Марквардта (Marquardt, 1963):

$$\Delta \mathbf{m} = \left(\mathbf{J}_W^T \mathbf{J}_W + \beta^2 \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{J}_W^T \Delta \mathbf{d}_W. \quad (1)$$

Здесь $\Delta \mathbf{m}$ — вектор приращений параметров модели на $k+1$ -й итерации, $\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k)$; $\Delta \mathbf{d}_W$ — взвешенный вектор невязок данных, $\Delta \mathbf{d}_W = \mathbf{W}(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}))$, где \mathbf{d} — вектор измеренных данных, $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ — вектор рассчитанных данных для модели \mathbf{m} , \mathbf{W} — диагональная матрица весов; $\mathbf{J}_W = \mathbf{W}\mathbf{J}$, где \mathbf{J} — матрица Якоби, содержащая частные производные данных по параметрам модели; β — множитель Лагранжа или сглаживающий параметр; \mathbf{I} — единичная матрица, а индекс Т обозначает операцию транспонирования.

При совместной инверсии данных постоянного тока и PMT-K использовались следующие векторы данных и модели (индекс DC обозначает данные ВЭЗ, индекс CSRMT — данные PMT-K) (Shlykov et al., 2021):

$$\mathbf{d} = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \log(\rho_k^{\text{DC}}) \right\} \\ \left\{ \log(\rho_k^{\text{CSRMT}}) \right\} \\ \left\{ \text{signlog}(\varphi_Z^{\text{CSRMT}}) \right\} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{W} = \left\{ \begin{array}{cc} \mathbf{W}_{\rho_k^{\text{DC}}} & 0 \\ & \mathbf{W}_{\rho_k^{\text{CSRMT}}} \\ 0 & \mathbf{W}_{\varphi_Z^{\text{CSRMT}}} \end{array} \right\}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{J}_{\rho_k^{\text{DC}}} \\ \mathbf{J}_{\rho_k^{\text{CSRMT}}} \\ \mathbf{J}_{\varphi_Z^{\text{CSRMT}}} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{m} = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \log(\rho_H) \right\} \\ \left\{ \log(\rho_V) \right\} \\ \left\{ \log(h) \right\} \end{array} \right\},$$

¹ Доступно на: <http://zond-geo.com> [Дата доступа 10.02.2023].

где ρ_k^{DC} — кажущееся сопротивление на постоянном токе для произвольной установки; ρ_k^{CSRMT} — кажущееся сопротивление в методе PMT-K; φ_Z^{CSRMT} — фаза импеданса в методе PMT-K; ρ_H — горизонтальное УЭС слоев; ρ_V — вертикальное УЭС слоев; h — их мощность. Функция $\text{signlog}(x) = \text{sign}(x) \cdot \log(|x| + 1)$ использована, чтобы сделать диапазон изменения фазы импеданса соизмеримым с диапазоном изменения $\log(\rho_k)$.

При логарифмической трансформации данных и параметров модели соответствующие элементы матрицы Якоби имеют следующий вид:

$$J_{ij}^{\rho_k} = \frac{\partial \log(\rho_{ki})}{\partial \log(m_j)} = \frac{m_j}{\rho_{ki}} \frac{\partial \rho_{ki}}{\partial m_j}, \quad J_{ij}^{\varphi_z} = \frac{\partial \text{signlog}(\varphi_{Zi})}{\partial \log(m_j)} = m_j (|\varphi_{Zi}| + 1) \frac{\partial \varphi_{Zi}}{\partial m_j}, \quad (3)$$

где i — индекс параметра данных; j — индекс параметра модели.

5. Результаты работ

На рис. 4 приведены частотные срезы кажущегося сопротивления и фазы импеданса по данным PMT-K для частот 550, 55 и 5.5 кГц. Пространственные вариации ρ_k и φ_Z указывают на значительную горизонтальную неоднородность верхней части разреза, связанную с изменением толщины активного слоя и чередованием участков талых пород и мерзлых пород с различной льдистостью. Низкие значения ρ_k в северо-западном углу участка (между ПК-160 и ПК-240 на профилях 3 и 4) на частотах 550 и 55 кГц и высокие значения фазы на частоте 550 кГц связаны с наличием глубокого талика, выявленного ранее по данным ЭТ (Rossi et al., 2022). Срезы на частоте 5.5 кГц соответствуют большей глубине проникновения электромагнитного поля и демонстрируют плавное изменение электрических свойств в нижней части разреза от южной к северной границе участка. Отрицательные значения фазы на срезе для частоты 5.5 кГц связаны с промежуточной зоной контролируемого источника.

Пример результатов совместной инверсии (полевые и расчетные кривые зондирований и одномерная анизотропная модель) для ПК-100 на профиле 2, для которого на рис. 3 приведены автоспектры сигнала, представлен на рис. 5. Геоэлектрические разрезы по профилю 2, построенные по результатам различных инверсий, приведены на рис. 6. Рельеф местности на участке работ слабо выражен (перепад высот на 240 м профиля не превышает 3 м), что дало основание не учитывать его при инверсии.

На рис. 5 наглядно демонстрируется, что кривая кажущегося сопротивления для ВЭЗ лежит существенно выше соответствующей кривой PMT-K. Это различие — результат влияния вертикальной электрической анизотропии в третьем сверху слое модели. Коэффициент анизотропии в этом слое оценивается средним значением 2.24, то есть вертикальное УЭС превышает горизонтальное в 5 раз. На отдельных пикетах величина λ достигает 4.7 (рис. 6, 3). На высоких частотах поле источника в методе PMT-K соответствует полю вертикально падающей плоской волны и зависит от величины ρ_H . Поле постоянного тока содержит гальваническую составляющую и определяется значением ρ_m . Без учета анизотропии построить единую модель, отвечающую как данным ЭТ, так и данным PMT-K, не удастся.

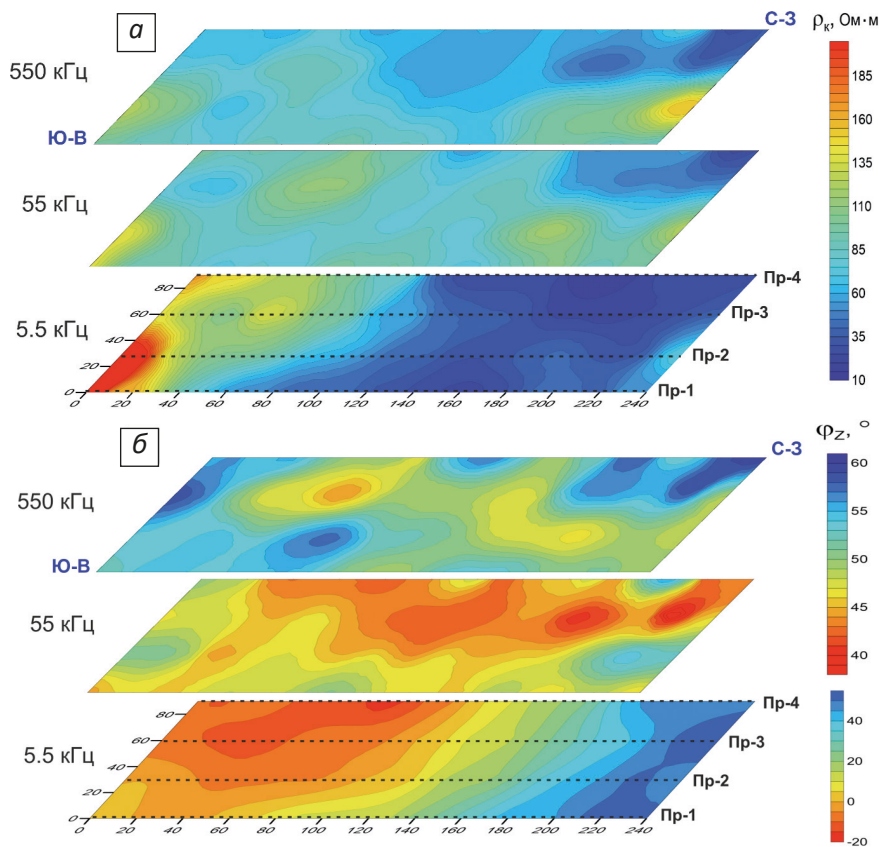


Рис. 4. Частотные срезы кажущегося сопротивления (а) и фазы импеданса (б) на разных частотах. Цветовые шкалы фазы для частоты 5.5 кГц и частот 55 и 550 кГц различны. Пунктиром показаны профили измерений. Масштаб на границах участка работ указан в метрах

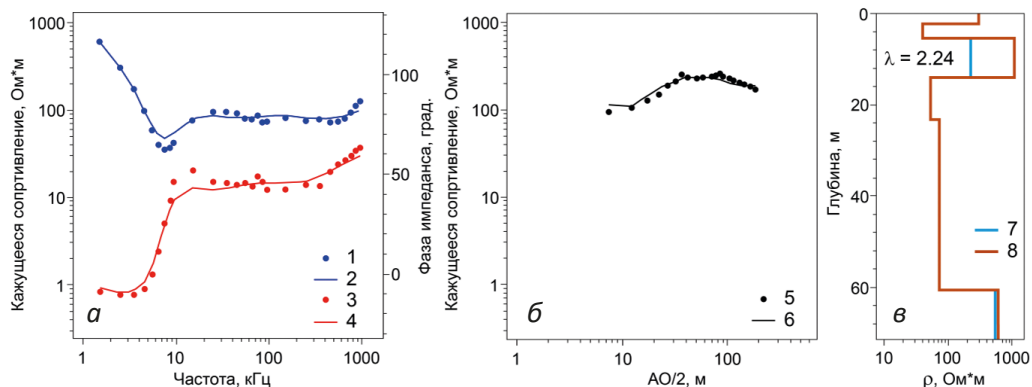


Рис. 5. Результаты совместной 1D анизотропной инверсии данных ЭТ и РМТ-К для ПК-100 на профиле 2:

а — кривые РМТ-К: 1 — амплитудная полевая кривая, 2 — амплитудная модельная кривая, 3 — фазовая полевая кривая, 4 — фазовая модельная кривая; б — кривые ВЭЗ для трехэлектродной установки АМН: 5 — полевая кривая, сформированная из данных ЭТ, 6 — модельная кривая; в — 1D анизотропная модель: 7 — ρ_H , 8 — ρ_V . Высоочастотная часть кривой РМТ-К соответствует малым разносам на кривой ВЭЗ

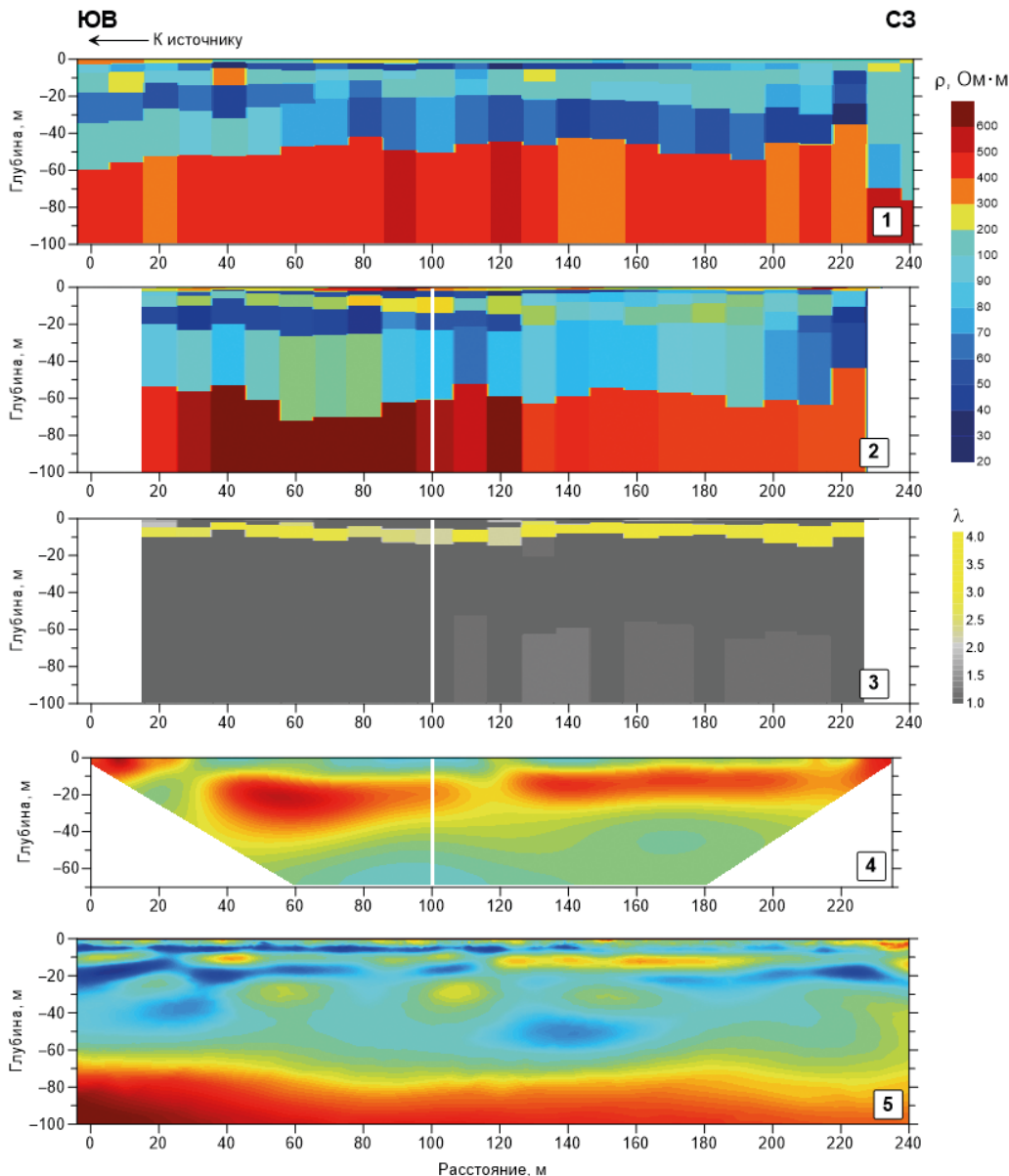


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по профилю 2:

1 — 1D изотропная инверсия данных РМТ-К с учетом промежуточной зоны; 2 — ρ_H по результатам совместной 1D анизотропной инверсии данных РМТ-К и ЭТ; 3 — λ по результатам совместной 1D анизотропной инверсии данных РМТ-К и ЭТ; 4 — 2D изотропная инверсия данных РМТ-К с учетом промежуточной зоны. Вертикальной белой линией выделен ПК-100, для которого на рис. 4 приведены кривые зондирования и одномерная анизотропная модель

Изотропная 2D инверсия данных ЭТ завышает мощность анизотропного слоя, что показано на рис. 6, 4.

На частотах ниже 10 кГц амплитудные и фазовые кривые РМТ-К выходят за пределы дальней зоны, что проявляется в росте значений ρ_k и уменьшении значений φ_Z . В нижней части разреза по данным РМТ-К выявляется высокоомное основание на глубине 60–70 м, причем по результатам как изотропной, так и анизотропной инверсии (рис. 6, 2 и 5). В данных ЭТ этот слой не проявился, поскольку этому методу в рассматриваемом случае не хватило глубинности.

Как видно из сравнения полученных разрезов, положение кровли высокоомного основания по результатам 1D изотропной инверсии данных РМТ-К (рис. 6, 1) отличается от результатов 1D совместной анизотропной инверсии данных РМТ-К и ЭТ (рис. 6, 2) и 2D изотропной инверсии данных РМТ-К (рис. 6, 5). 1D изотропная инверсия данных РМТ-К занижает значения УЭС в верхней части разреза и глубину до высокоомного основания. Можно рассматривать это как проявление S-эквивалентности в поле плоской волны. Учет гальванической моды при совместной инверсии данных РМТ-К и ЭТ снижает влияние S-эквивалентности. 2D изотропная инверсия данных РМТ-К, выполнявшаяся в программе MARE2DEM в варианте Оккама с минимизацией негладкости модели, восстанавливает наименее контрастный разрез, и глубина до высокоомного основания соответствует результату совместной инверсии данных РМТ-К и ЭТ.

6. Обсуждение результатов

Термометрические скважины на полигоне достигают глубин 5–6 м. По керну скважин, близких к участку геофизической съемки, глубже 2.5–3 м залегают мерзлые тяжелые суглинки, их криотекстура меняется от слоистой до сетчатой (Rossi et al., 2022). Данные электроразведки показывают, что вертикальная анизотропия электрических свойств связана с этими отложениями. По результатам совместной инверсии данных РМТ-К и ЭТ кровля высокоомного анизотропного слоя залегает на глубине от 2 до 5.5 м, подошва — от 8 до 20 м. Слой подстилается низкоомной толщей мощностью 40–50 м. Таким образом, сделанные по результатам предыдущих работ на территории полигона методом ЭТ оценки мощности высокоомного слоя (от 30 до 50 м), интерпретируемого как слой многолетнемерзлых пород (Tanapayev et al., 2021; Rossi et al., 2022), скорее всего, являются завышенными.

Для ответа на вопрос, ограничивается ли мерзлая толща анизотропным слоем, или подстилающие его низкоомные отложения также находятся в мерзлом состоянии, но имеют другую криотекстуру, необходимо бурение в пределах полигона на соответствующие глубины. Однако ряд выводов можно сделать, анализируя геологические данные по близлежащему обнажению на берегу р. Воркута и разрезу, вскрываемому эксплуатируемой водозаборной скважиной 39-Э на станции Хановой, находящейся в 1 км от участка работ (см. рис. 1).

Разрез в районе работ по данным скважины 39-Э (рис. 7) соответствует региональному и представлен четвертичными отложениями (ледниково-морскими суглинками), залегающими на терригенных породах пермского возраста (алевролиты, аргиллиты, песчаники). Мощность мерзлой четвертичной толщи, вскрытой скважиной, составляет 55 м. В непосредственной близости от электроразведочных

Глубина, м	Геологический индекс	Литологическая колонка	Литологический состав вскрытых отложений	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м
10	gm II rg		Суглинок с гравием, галькой и валунами, мерзлый	55.0	55.0
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80	Песчаник	85.0	15.0		
90					
100	Аргиллит	95.0	10.0		
110					
120	Алевролит	110.0	15.0		
130					
140	Аргиллит	120.0	10.0		
130					
140	Песчаник	140.0	20.0		
140					

Рис. 7. Геологический разрез водозаборной скважины 39-Э на станции Хановей (Федосеева и др., 2011)

профилей, по которым проводились работы методом РМТ-К, коренные пермские породы выходят на поверхность в русле р. Воркута, образуя перекаат (рис. 8). Таким образом, есть основания полагать, что мощность четвертичных пород (преимущественно суглинков) на участке работ близка к высоте берегового уступа и составляет около 15 м. В этом случае высокоомный анизотропный слой, выявляемый электроразведкой, целиком соответствует мерзлым четвертичным отложениям, а подстилающий его низкоомный слой является верхней частью толщи пермских отложений, находящейся в талом состоянии. Данные исследований, проведенных



Рис. 8. Вид на долину р. Воркута в районе работ. Обозначена высота берегового уступа и место выхода коренных пород (фото Н. Ю. Боброва)

в водозаборной скважине 39-Э и представленных в фондовом отчете (Федосеева и др., 2011), не противоречат этому выводу.

В соответствии с результатами исследований в скважине 39-Э, мерзлые суглинки играют роль водоупора, а продуктивным комплексом являются пермские породы. При этом вся толща перми в той или иной степени трещиновата и обводнена, хотя по паспортным данным значимый водоприток стал поступать в скважину с глубины 95 м, при вскрытии прослоя алевролита. В работе (Тапанаяев et al., 2021) отмечена возможность фильтрации воды по таликовым зонам из подмерзлотных источников на поверхность на основании близости изотопного состава проб воды из скважины 39-Э и из поверхностного водоема в тальвеге на участке мерзлотного полигона. Поскольку подмерзлотные воды являются напорными, и в скважине 39-Э величина напора над кровлей обводненной толщи составляет 40.6 м (Федосеева и др., 2011), этот процесс весьма вероятен.

Таким образом, имеющиеся данные указывают на то, что верхняя часть толщи пермских отложений находится в талом состоянии и является трещиноватой и водонасыщенной, что согласуется с относительно низким УЭС в средней части разреза (от 15–20 до 60–70 м) по данным РМТ-К.

Нижняя часть разреза пермских отложений (ниже 60–70 м) по данным РМТ-К является более высокоомной. На частотах, соответствующих этим глубинам, кривые РМТ-К переходят в промежуточную зону, где импеданс зависит уже не только от ρ_H , но и от ρ_V . Толща пермских пород представляет собой чередование прослоев терригенных пород разного состава. Данные электроразведки методом ВЭЗ, выполненной на Хановейской площади в начале 1970-х годов (Бороздин и Белкин, 1972), также свидетельствуют об увеличении УЭС пермских пород с глубиной. На ближайшем к району работ профиле № 52, пересекающем р. Воркута, кривые ВЭЗ относятся к типу А или Н-А, при этом УЭС в нижней части пермской толщи достигает сотен омметров, что подтверждает оценки, сделанные по данным метода РМТ-К.

7. Заключение

По результатам выполненных работ могут быть сделаны следующие выводы:

1. Совместное применение методов РМТ-К и ЭТ на полигоне Хановой позволило выявить вертикальную анизотропию электрических свойств мерзлых четвертичных отложений в верхней части геологического разреза, в интервале глубин от 2 до 20 м. Анизотропия характерна для мерзлых глинистых отложений, вскрываемых параметрическими скважинами, и связана с их криотекстурой. Коэффициент анизотропии в пределах участка исследований преимущественно находится в интервале от 2 до 4.

2. По данным ЭТ анизотропный слой проявляется как высокоомный, оценки его мощности, сделанные без учета анизотропии, являются завышенными. Вопрос о том, можно ли считать его нижнюю границу подошвой мерзлоты, пока остается открытым.

3. Имеющиеся данные гидрогеологических исследований показывают, что коренные терригенные отложения пермского возраста в районе полигона находятся в талом состоянии и в верхней части являются трещиноватыми и водонасыщенными, что объясняет низкие значения их УЭС по данным электроразведки.

4. По данным РМТ-К на полигоне выявляется высокоомный слой в основании геоэлектрического разреза. Как совместная анизотропная 1D инверсия данных РМТ-К и ЭТ, так и сглаженная 2D изотропная инверсия данных РМТ-К дают близкие оценки глубины его залегания — 60–70 м. Изотропная 1D инверсия данных РМТ-К занижает глубину до высокоомного основания и УЭС перекрывающих пород.

Благодарности

Авторы благодарны за помощь в проведении работ геологическому факультету МГУ им. М. В. Ломоносова и дирекции Северной железной дороги — филиала ОАО «РЖД».

Литература

- Бердичевский, М. Н. и Дмитриев, В. И. (2009). *Модели и методы магнитотеллурики*. М.: Научный мир.
- Бобачев, А. А., Горбунов, А. А., Модин, И. Н., Шевнин, В. А. (2006). Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. *Приборы и системы разведочной геофизики*, 2, 14–17.
- Бороздин, Ю. Г. и Белкин, В. И. (1972). *Отчет о работе Хановейской комплексной геофизической партии № 6/70–71 на Хановейской и Елец-Кечпельской площадях с целью поисков и оконтуривания предполагаемых синклинальных структур*. М.: ФГБУ «Росгеолфонд».
- Ваньян, Л. Л. (1965). *Основы электромагнитных зондирований*. М.: Недра.
- Ершов, Э. Д. (2002). *Общая геокриология*. М.: Изд-во МГУ.
- Иванов, П. В., Алексеев, Д. А., Бобачев, А. А., Пушкарев, П. Ю., Яковлев, А. Г. (2011). О комплексировании методов вертикального электрического зондирования и зондирования становлением поля в ближней зоне. *Инженерные изыскания*, 11, 42–51.
- Каминский, А. Е., Ерохин, С. А., Шлыков, А. А. (2015). Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и РМТ/АМТ. *Геофизика*, 4, 32–39.
- Котов, П. И. и Гордеева, Г. И., ред. (2022). *Пособие по Воркутинской геокриологической научно-учебной практике*. М.: Изд-во МГУ.
- Краев, А. П. (1965). *Основы геоэлектрики*. 2-е изд. Л.: Недра.

- Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами (1989). М.: Стройиздат.
- Сараев, А. К., Симаков, А. Е., Шлыков, А. А. (2014). Метод радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником. *Геофизика*, 1, 18–25.
- Федосеева, Н. И., Степанова, Л. К., Федоришин, И. Б. (2011). *Подсчет эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения железнодорожных станций Хановей и Чум*. [отчет] М.: ФГБУ «Росгеолфонд».
- Фролов, А. Д. (1998). *Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов*. Пуштино: ОНТИ ПНЦ РАН.
- Шевнин, В. А., ред. (2012). *Изучение анизотропии в методе сопротивлений*: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ.
- Шевнин, В. А., Бобачев, А. А., Модин, И. Н., Ялов, Т. В. (2013). Различия результатов гальванических и индуктивных методов, новые примеры для ДИП и БИЭП. *Записки Горного института*, 200, 104–107.
- Шлыков, А. А. (2014). *Программа для моделирования электромагнитного поля кабеля конечной длины (CS1D)*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20144664164; заявл. 30.12.2014; запат. 21.04.2015.
- Bastani, M. (2001). *EnviroMT — a new controlled source/radiomagnetotelluric system*. PhD thesis. Uppsala: Uppsala University.
- Briggs, M. A., Campbell, S., Nolan, J., Walvoord, M. A., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F. D., Lane, J. W. (2017). Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28 (1), 52–65. <https://doi.org/10.1002/ppp.1893>
- Candansayar, M. E. and Tezkan, B. (2008). Two-dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 56, 737–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00695.x>
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 1019–1029. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6)
- Demirci, I., Candansayar, E. M., Vadidis, A., Souplos, P. (2017). Two-dimensional joint inversion of direct current resistivity, radio-magnetotelluric and seismic refraction data: An application from Bafra Plain, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 139, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.002>
- Hauck, C. (2013). New concepts in geophysical surveying and data interpretation for permafrost terrain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24 (2), 131–137. <https://doi.org/10.1002/ppp.1774>
- Jupp, D. L. B. and Vozoff, K. (1977). Resolving anisotropy in layered media by joint inversion. *Geophysical Prospecting*, 25, 460–470. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1977.tb01181.x>
- Kalscheuer, T., Garcia, M., Meqbel, N., Pedersen, L. B. (2010). Non-linear model error and resolution properties from two-dimensional single and joint inversions of direct current resistivity and radiomagnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 182, 1174–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04686.x>
- Key, K. (2016). MARE2DEM: A 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 207 (1), 571–588. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>
- Kneisel, C., Hauck, C., Fortier, R., Moorman, B. (2008). Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19 (2), 157–178. <https://doi.org/10.1002/ppp.616>
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135–156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- Maillet, R. (1947). The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, 12, 529–556. <https://doi.org/10.1190/1.1437342>
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
- Raiche, A. P., Jupp, D. L. B., Rutter, H., Vozoff, K. (1985). The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schlumberger sounding to resolve layered structures. *Geophysics*, 50, 1618–1627. <https://doi.org/10.1190/1.1441851>
- Rossi, M., Dal Cin, M., Picotti, S., Gei, D., Isaev, V. S., Pogorelov, A. V., Gorshkov, E. I., Sergeev, D. O., Kotov, P. I., Giorgi, M., Rainone, M. L. (2022). Active layer and permafrost investigations using geophysical and

- geocryological methods — a case study of the Khanovey area, near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. *Frontiers in Earth Science*, 10:910078. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
- Saraev, A. K., Shlykov, A. A., Tezkan, B. (2022). Application of the controlled source radiomagnetotellurics (CSRMT) in the study of rocks overlying kimberlite pipes in Yakutia/Siberia. *Geosciences*, 12 (1), 34. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010034>
- Saraev, A. K., Shlykov, A. A., Bobrov, N. Y. (2023). Tensor CSRMT system with horizontal electrical dipole sources and prospects of its application in Arctic permafrost regions. *Eng*, 4 (1), 569–580. <https://doi.org/10.3390/eng4010034>
- Saraev, A., Simakov, A., Shlykov, A., Tezkan, B. (2017). Controlled-source radiomagnetotellurics: A tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics*, 146, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.017>
- Shlykov, A. A. and Saraev, A. K. (2015). Estimating the Macroanisotropy of a Horizontally Layered Section from Controlled Source Radiomagnetotelluric Soundings. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51 (4): 583–601. <https://doi.org/10.1134/S1069351315040102>
- Shlykov, A., Saraev, A., Agrahari, S. (2019). Study of the anisotropy of horizontally layered section using data of the controlled source radiomagnetotellurics. *Geophysica*, 54 (2), 3–21.
- Shlykov, A., Saraev, A., Agrahari, S., Tezkan, B., Singh, A. (2021). One-dimensional laterally constrained joint anisotropic inversion of CSRMT and ERT Data. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6, 35–48. <https://doi.org/10.32389/JEEG20-060>
- Shlykov, A., Saraev, A., Tezkan, B. (2020). Study of a permafrost area in the northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics. *Pure and Applied Geophysics*, 177 (12), 5845–5859. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02621-x>
- Tananaev, N., Isaev, V., Sergeev, D., Kotov, P., Komarov, O. (2021). Hydrological connectivity in a permafrost tundra landscape near Vorkuta, North-European Arctic Russia. *Hydrology*, 8 (3), 106. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030106>
- Zonge, K.L. and Hughes, L.J. (1991). Controlled-source audio-frequency magnetotellurics. In: M.N.Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*. SEG, 2. 713–809. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch9>

Статья поступила в редакцию 13 мая 2023 г.
Статья рекомендована к печати 10 ноября 2023 г.

Контактная информация:

Бобров Никита Юрьевич — n.bobrov@spbu.ru
Шлыков Арсений Андреевич — a.shlykov@spbu.ru
Сараев Александр Карпович — a.saraev@spbu.ru
Исаев Владислав Сергеевич — vsisaev@yanao.ru
Балахнин Андрей Иванович — st087319@student.spbu.ru

Study of the anisotropy of frozen rocks at the Khanovei test site (Komi Republic) based on the data of controlled source radio-magnetotelluric soundings and electrical resistivity tomography*

N. Yu. Bobrov¹, A. A. Shlykov¹, A. K. Saraev¹, V. S. Isaev², A. I. Balakhnin¹

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Scientific Center of Arctic Research,
20, ul. Respubliki, Salekhard, 629008, Russian Federation

For citation: Bobrov, N. Yu., Shlykov, A. A., Saraev, A. K., Isaev, V. S., Balakhnin, A. I. (2023). Study of the anisotropy of frozen rocks at the Khanovei test site (Komi Republic) based on the data of controlled source radio-magnetotelluric soundings and electrical resistivity tomography. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (4), 696–716. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.405> (In Russian)

The results of a joint inversion of the data of controlled source radio-magnetotelluric soundings (CSRMT) and electrical resistivity tomography (ERT), obtained at the Khanovei permafrost test site near Vorkuta, are presented. The geological section in the work area is composed of Quaternary fluvio-glacial, lacustrine-glacial and alluvial deposits up to 60 m thick, overlying a sequence of sandstones, siltstones and mudstones of Permian age. The CSRMT survey was carried out using a grounded electrical line 480 m long as a source in the frequency range 1–1000 kHz. The results of various inversion options were compared: 1) isotropic one-dimensional (1D) inversion of CSRMT data; 2) isotropic separate two-dimensional (2D) inversion of CSRMT and ERT data; 3) joint anisotropic 1D inversion of CSRMT and ERT data. Based on the results of a joint anisotropic inversion of CSRMT data in the far and intermediate zones of the source and ERT data, a vertical anisotropy associated with horizontal layering of frozen Quaternary clay deposits in the depth range from 2 to 15–20 m was revealed and its parameters (horizontal and vertical resistivity and anisotropy coefficient) were determined. On the geoelectric section obtained from the ERT data, the thickness of the anisotropic layer of frozen clayey deposits is significantly overestimated. The middle part of the section, in the depth range from 15–20 to 60–70 m, is characterized by relatively low resistivity values (tens of ohmmeters). This is consistent with the results of previous studies, which established that the upper part of the Permian sediments is in a thawed state and is fractured and water-saturated. A high-resistivity layer (hundreds of ohmmeters) was revealed at the base of the geoelectric section according to CSRMT data. A significant increase in the resistivity of Permian rocks with depth is confirmed by the data of vertical electrical soundings previously performed in the Khanovei area.

Keywords: permafrost, anisotropy of electrical properties, electrical resistivity tomography, radio-magnetotelluric soundings, controlled source.

References

- Bastani, M. (2001). *EnviroMT — a new controlled source/radiomagnetotelluric system*. PhD thesis. Uppsala: Uppsala University.
- Berdichevsky, M. N. and Dmitriev, V. I. (2009). *Models and methods of magnetotellurics*. Moscow: Nauchnyi mir Publ. (In Russian)

* The research was funded by the Russian Science Foundation, project no. 21-47-04401 and the Research park of St. Petersburg State University “Center for Geo-Environmental Research and Modeling (GEOMODEL)”.

- Bobachev, A. A., Gorbunov, A. A., Modin, I. N., Shevnin, V. A. (2010). Electrical resistivity and induced polarization tomography. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 2, 14–17. (In Russian)
- Borozdin, Yu. G. and Belkin, V. I. (1972). *Report on the work of the Khanoveiskaya integrated geophysical party no. 6/70-71 in the Khanoveiskaya and Yelets-Kechpelskaya areas in order to search for and delineate the alleged synclinal structures*. Moscow: FGBU “Rosgeolfond” Publ. (In Russian)
- Briggs, M. A., Campbell, S., Nolan, J., Walvoord, M. A., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F. D., Lane, J. W. (2017). Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28 (1), 52–65. <https://doi.org/10.1002/ppp.1893>
- Candansayar, M. E. and Tezkan, B. (2008). Two-dimensional joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 56, 737–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00695.x>
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 1019–1029. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6)
- Demirci, I., Candansayar, E. M., Vadidis, A., Soupios, P. (2017). Two-dimensional joint inversion of direct current resistivity, radio-magnetotelluric and seismic refraction data: An application from Bafra Plain, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 139, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.03.002>
- Ershov, E. D. (2002). *General geocryology*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Fedoseeva, N. I., Stepanova, L. K., Fedorishin, I. B. (2011). *Calculation of operational reserves of groundwater for domestic and technical water supply of railway stations Khanovei and Chum*. [report] Moscow: FGBU “Rosgeolfond” Publ. (In Russian)
- Frolov, A. D. (1998). *Electrical and elastic properties of frozen Earth materials*. Pushchino: ONTI PNTs RAN Publ. (In Russian)
- Hauck, C. (2013). New concepts in geophysical surveying and data interpretation for permafrost terrain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(2), 131–137. <https://doi.org/10.1002/ppp.1774>
- Ivanov, P. V., Alekseev, D. A., Bobachev, A. A., Pushkarev, P. Yu., Yakovlev, A. G. (2011). On the integration of the methods of vertical electrical sounding and the near-field transient electromagnetic sounding. *Inzhenernye izyskaniia*, 11, 42–51. (In Russian)
- Jupp, D. L. B. and Vozoff, K. (1977). Resolving anisotropy in layered media by joint inversion. *Geophysical Prospecting*, 25, 460–470. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1977.tb01181.x>
- Kalscheuer, T., Garcia, M., Meqbel, N., Pedersen, L. B. (2010). Non-linear model error and resolution properties from two-dimensional single and joint inversions of direct current resistivity and radiomagnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 182, 1174–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04686.x>
- Kaminsky, A. E., Erokhin, S. A. Shlykov, A. A. (2015). Joint two-dimensional inversion of electrical resistivity tomography and RMT/AMT data. *Geofizika*, 4, 32–39. (In Russian)
- Key, K. (2016). MARE2DEM: A 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 207 (1), 571–588. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>
- Kneisel, C., Hauck, C., Fortier, R., Moorman, B. (2008). Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19 (2), 157–178. <https://doi.org/10.1002/ppp.616>
- Kotov, P. I. and Gordeev, G. I., ed. (2022). *Manual on Vorkuta geocryological scientific and educational practice*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Kraev, A. P. (1965). *Fundamentals of geoelectrics*. 2nd ed. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135–156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- Maillet, R. (1947). The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, 12, 529–556. <https://doi.org/10.1190/1.1437342>
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
- Raiche, A. P., Jupp, D. L. B., Rutter, H., Vozoff, K. (1985). The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schlumberger sounding to resolve layered structures. *Geophysics*, 50, 1618–1627. <https://doi.org/10.1190/1.1441851>
- Recommendations for the determination of the physical and mechanical properties of frozen dispersed soils by geophysical methods* (1989). Moscow: Stroiizdat Publ. (In Russian)

- Rossi, M., Dal Cin, M., Picotti, S., Gei, D., Isaev, V.S., Pogorelov, A. V., Gorshkov, E. I., Sergeev, D. O., Kotov, P. I., Giorgi, M., Rainone, M. L. (2022). Active layer and permafrost investigations using geophysical and geocryological methods — a case study of the Khanovey area, near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. *Frontiers in Earth Science*, 10:910078. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
- Saraev, A. K., Shlykov, A. A., Tezkan, B. (2022). Application of the controlled source radiomagnetotellurics (CSRMT) in the study of rocks overlying kimberlite pipes in Yakutia/Siberia. *Geosciences*, 12 (1), 34. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010034>
- Saraev, A. K., Simakov, A. E., Shlykov, A. A. (2014). Method of radio magnetotelluric soundings with a controlled source. *Geofizika*, 1, 18–25. (In Russian)
- Saraev, A., Simakov, A., Shlykov, A., Tezkan, B. (2017). Controlled-source radiomagnetotellurics: a tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics*, 146, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.017>
- Saraev, A. K., Shlykov, A. A., Bobrov, N. Y. (2023). Tensor CSRMT system with horizontal electrical dipole sources and prospects of its application in Arctic permafrost regions. *Eng*, 4 (1), 569–580. <https://doi.org/10.3390/eng4010034>
- Shevnin, V. A., ed. (2012). *Study of anisotropy in the resistivity method: Tutorial*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Shevnin, V. A., Bobachev, A. A., Modin, I. N., Yalov, T. V. (2013). Difference in galvanic and inductive methods results, new examples for DIP and BIEP. *Journal of Mining Institute*, 200, 104–107. (In Russian)
- Shlykov, A. A. (2014). *Program for modeling of electromagnetic field of a cable of finite length (CS1D)*. Certificate of state registration of the computer program no. 2014664164; dec. 12/30/2014; registered 04/21/2015. (In Russian)
- Shlykov, A. A. and Saraev, A. K. (2015). Estimating the macroanisotropy of a horizontally layered section from controlled-source radiomagnetotelluric soundings. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51 (4), 583–601. <https://doi.org/10.1134/S1069351315040102>
- Shlykov, A., Saraev, A., Aghahari, S. (2019). Study of the anisotropy of horizontally layered section using data of the controlled source radiomagnetotellurics. *Geophysics*, 54 (2), 3–21.
- Shlykov, A., Saraev, A., Aghahari, S., Tezkan, B., Singh, A. (2021). One-dimensional laterally constrained joint anisotropic inversion of CSRMT and ERT Data. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 6, 35–48. <https://doi.org/10.32389/JEEG20-060>
- Shlykov, A., Saraev, A., Tezkan, B. (2020). Study of a permafrost area in the northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics. *Pure and Applied Geophysics*, 177 (12), 5845–5859. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02621-x>
- Tananaev, N., Isaev, V., Sergeev, D., Kotov, P., Komarov, O. (2021). Hydrological connectivity in a permafrost tundra landscape near Vorkuta, North-European Arctic Russia. *Hydrology*, 8 (3), 106. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030106>
- Vanyan, L. L. (1965). *Fundamentals of electromagnetic soundings*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Zonge, K. L. and Hughes, L. J. (1991). Controlled-source audio-frequency magnetotellurics. In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*. SEG, 2, 713–809. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch9>

Received: May 13, 2023

Accepted: November 10, 2023

Authors' information:

Nikita Yu. Bobrov — n.bobrov@spbu.ru

Arseny A. Shlykov — a.shlykov@spbu.ru

Alexander K. Saraev — a.saraev@spbu.ru

Vladislav S. Isaev — vsisaev@yanao.ru

Andrey I. Balakhnin — st087319@student.spbu.ru