

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТАХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ОЗЕРНОГО ГОКА

М.С. Шкиря¹, Ю.А. Давыденко², П.С. Бадминов³, С.А. Терешкин⁴, А.С. Башкеев⁵

¹ ИРНТУ, mshkiria@geo.istu.edu

² ИРНТУ, ООО «Гелиос», ИЗК СО РАН, dya@geo.istu.edu

³ ИЗК СО РАН, prokop_sbada@mail.ru

⁴ ИРНТУ, stereshkin@geo.istu.edu

⁵ ИРНТУ, abashkeev@geo.istu.edu

АННОТАЦИЯ

Целью комплексных электроразведочных работ являлись поиски подземных вод для технологического водоснабжения объектов Озерного ГОКа в Республике Бурятия. Работы выполнялись на поисковой площади, где перспективным для технологического водоснабжения являются высоконапорные подмерзлотные воды. Для решения поставленных задач применялись два метода: электротомография и метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. В результате проведенного комплекса исследований уточнено геологическое строение района работ, выбрана в качестве перспективной на подземные воды часть разреза, соответствующая интервалу 90-200 м. Бурением и комплексом геофизических исследований скважин подтверждены обводнённые разломные зоны, определены границы многолетней мерзлоты, в которой выделены межмерзлотные талики и слой «вялой» мерзлоты, характеризующийся низкими значениями удельного электрического сопротивления.

Ключевые слова: электротомография, импульсная электроразведка, электромагнитные зондирования, разломная зона, запасы подземных вод.

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. проводились поисково-оценочные гидрогеологические работы для обеспечения производственно-технического водоснабжения объектов Озерного ГОКа, находящегося на территории Еравнинского района Республики Бурятия, за счет напорных подмерзлотных вод межгорного артезианского бассейна р Заза. Учитывая высокую, 3-ю категорию сложности участка, в комплекс работ входили два электроразведочных метода: электротомография и метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) (Давыденко Ю.А. и др., 2015).

В комплексе гидрогеологических исследований электроразведочные работы должны были решить следующие задачи: выделение таликовых зон и определение их границ; уточнение мощности многолетнемерзлых пород (ММП); определение ширины и крутизны разломных зон. Учитывая неблагоприятный для электротомографии фактор - мощный экранирующий слой высокоомных ММП (около 100 м), для обеспечения глубинности исследований в 200 м применялась технология ЭМЗ-ВП. Полученные в результате решения обратных задач геоэлектрические разрезы использовались для уточнения положения поисковых гидрогеологических скважин. Результаты бурения и данные каротажа были

сопоставлены с электроразведочными моделями, что позволило получить достаточно полное понимание геологического строения участка работ. По данным ЭМЗ-ВП с точностью до 5 м, определены границы многолетней мерзлоты, в которой выделены межмерзлотные талики и слой «вялой» мерзлоты с низкими значениями УЭС.

Зазинская межгорная впадина представляет собой грабенообразную линейно вытянутую структуру, выполненную юрско-меловыми нормально-осадочными и эффузивно-осадочными отложениями общей мощностью до 1500 м, которые перекрыты мерзлыми четвертичными образованиями. Фундамент впадины и его горно-складчатое обрамление сложено палеозойскими гранитоидами Бичурского комплекса (Гидрогеология СССР. Т. XXII). Зоны разломов, связаны с мезозойским рифтогенезом и имеют преимущественно северо-восточное простирание, плоскости их сместителей падают, как правило, в сторону оси впадины. Такие разломы, прослеживающиеся вдоль мезозойских структур, развивались одновременно с ними, определяя границы мезозойского осадконакопления и распределение фаций осадков внутри впадин. Наблюдается также несколько разломов северо-западного и субширотного простирания, показанных на рисунке 2. В гидрогеологическом отношении Зазинская межгорная впадина

представляет собой небольшой артезианский бассейн подмерзлотного типа. Питание подземных вод бассейна происходит за счет подтока трещинных вод горных массивов, окаймляющих впадину, поверхностными водами через подрусловые и подозерные талики. Подмерзлотные воды юрско-меловых отложений вскрыты скважинами на глубине 60-100 м непосредственно под мерзлыми породами. Дебиты скважин, вскрывших воды песчаников, алевролитов, гравелитов составляют 12-15 л/с при понижении на 24,8-39,0 м. Пьезометрические уровни устанавливаются на высоте 6-6,5 м над поверхностью земли. Воды характеризуются значительным напором, достигающим 100 м, и являются наиболее перспективными для водоснабжения.

МЕТОД И ТЕОРИЯ

Для получения общей информации о геоэлектрическом строении площади работ использовались результаты съемки аэроэлектроразведочной системой EM-4Н. Исходные данные съемки, выполненной по профилям через 500 м, были любезно предоставлены начальником отдела геолого-геофизических технологий А.А. Трусовым.

Аппаратура EM-4Н производит одновременные измерения на четырех частотах 130, 520, 2080 и 8320 Гц с шагом по профилю в первые метры. В качестве источника поля используется закрепленная на фюзеляже летательного аппарата горизонтальная многовитковая рамка (вертикальный магнитный диполь). Результатом работы системы EM-4Н являются квадратурные компоненты и фазы компонент вектора переменного магнитного поля на каждой из рабочих частот 130, 520, 2080 и 8320 Гц. Кроме того, вычисляются традиционные для метода ДИП-А отношения полуосей, квадраты больших полуосей и углы в осях приемника больших полуосей эллипсов поляризации (Shargorodsky A.V. et al., 2014). В первичных обработанных данных электроразведки на всех частотах сильно преобладают региональные компоненты полей, что не позволяет получить полезную информацию о геологическом строении участка. Для выделения локальных параметров было принято решение использовать средства математической статистики, таких как многомерный регрессионный анализ и робастное сглаживание. Обработку данных аэроэлектроразведки выполнил профессором А.Ю. Давыденко в программе MatLab. В результате в данных частотной аэроэлектроразведки выделяются зоны пониженного и повышенного сопротивлений, которые, опираясь на данные наземных электромагнитных зондирований, можно

условно привязать по глубине.

Детальное строение верхней части разреза до глубин 70 – 100 м было получено по данным электротомографии, выполненной аппаратурой «Скала-64» (Официальный сайт GEODEVICE). При проведении электротомографии для увеличения глубинности исследований использовалась прямая трехэлектродная установка с выносным питающим электродом на расстоянии 1000 м. перпендикулярно профилю. При регистрации разности потенциалов использовался прямоугольный импульс тока продолжительностью 80 мс и две косы длиной по 155 м с шагом между электродами в 5 м. Инверсия данных электротомографии выполнялась в рамках двухмерных моделей в программе «ZondRes2D» (Официальный сайт Zond Software).

Глубинность исследования до 200 м. достигалась за счет применения метода импульсной электроразведки ЭМЗ-ВП. Разрез возбуждался с помощью электрического диполя АВ, в то время как разность потенциалов измерялась на приемных электродах. В методе ЭМЗ-ВП используется установка срединного градиента (Жданов М.С. и др., 1986). Использование установки с закрепленным генераторным источником и перемещающимся относительно него измерителем, используется в электроразведке с конца 80-х г. прошлого века (Соловейчик Ю. Г. и др., 2003; Gorunov A. et al, 2003). В различных модификациях метода вызванной поляризации (ВП) измерительные установки и временные диапазоны подбираются таким образом, чтобы минимизировать вклад индукционных процессов, которые традиционно рассматриваются как мешающий фактор (Давыденко Ю.А. и др., 2015). В методе ЭМЗ-ВП эти процессы используются для извлечения информации о строении геоэлектрического разреза. Разница напряжений между приемными электродами контролируется во времени (интервал 125 мс). Переходный процесс также регистрируется во время выключения тока. Такой подход позволяет устойчиво выделять эффект ВП в исследуемых породах и, в конечном итоге, перейти от традиционных кажущихся параметров (кажущегося сопротивления (ρ_k) и кажущейся поляризуемости (η_k) к построению трехмерных геоэлектрических моделей по результатам решения обратной задачи, с учетом частотной дисперсии электропроводности (Veeken, P. et al., 2009).

В рамках одномерных моделей с целью определения перспективных зон для постановки поисково-разведочного бурения скважин на воду была выполнена инверсия электромагнитных зондирований. При моделировании, осуществляемом в программе Mars1D, расчеты

велись путём использования комплексного значения УЭС, зависящего от частоты. Для описания частотной зависимости УЭС использовалась формула Cole-Cole, применение которой позволяет описать большинство экспериментальных дисперсионных зависимостей в горных породах (Cole, K.S. and R.H. Cole, 1941). В нашем случае вклад эффектов вызванной поляризации оценен как незначительный, поскольку на в хвосте кривой, на поздних временных задержках от 80 до 125 мс значения кажущейся поляризуемости (отношение интегрального значения на заданном интервале в хвосте кривой к значению поля пропускания, взятого перед выключением тока) не превышало 0.5%. В результате моделирование электромагнитных зондирований выполнялось с закрепленными на нулевых значениях поляризационными параметрами, что не отразилось на качестве подбора.

Геофизические исследования скважин (ГИС) включал классический комплекс методов для исследований гидрогеологических скважин: гамма-каротаж (ГК), метод кажущегося электрического сопротивления (КС), каротаж потенциалов собственной поляризации (ПС), кавернометрия (КВ), расходометрия (РМ), резистивиметрия (РЗ) и термометрия (ТМ).

Метод кажущегося электрического сопротивления проводился комплексным скважинным прибором КСП-48МКС-2 с применением стандартного градиент-зонда с формулой $M0.5A0.1B$ (Официальный сайт Геофизическое оборудование и услуги ООО «НПФ УГФ»), рассчитанным на выделение пластов рабочей мощности (0.5 м и более), с целью литологического расчленения разреза, и выделения обводнённых интервалов. Термометрия выполнялась с применением скважинного термометра КТ-38МК2 для определения температуры воды в скважине и выделения в разрезе зоны ММП.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты инверсии данных ЭМЗ-ВП в виде горизонтального среза на глубине 100 – 125 м показаны на рисунке 2. Представлена карта УЭС на подложке с результатом обработки данных аэроэлектроразведки на частоте 2080 Гц методами многомерного статистического анализа.

Анализ всей совокупности геофизических данных, включая каротаж и результаты бурения показывает, что многолетнемерзлые породы делятся на «сплошную» мерзлоту с УЭС от 200 до 1500 Ом·м, расположенную от поверхности до глубины 30 – 100 м, и подстилающую ее «вялую» мерзлоту, как правило, с меньшими

УЭС – до 10 Ом·м. На некоторых профилях между сплошной и вялой мерзлотой встречаются межмерзлотные воды мощностью от 20 до 30 м., характеризующиеся низкими УЭС – около 5-10 Ом·м. В пределах исследованных участков выделены межмерзлотные воды – таликовые зоны, которые не были отдельно исследованы гидрогеологическими методами. На профиле 1, представленном на рисунке 3, в вертикальном разрезе выявлена относительно большая мощность сплошных многолетнемерзлых пород – около 65 м при общей мощности ММП от 110 до 135 м. Межмерзлотные зоны отсутствуют. Повышенные зоны проводимости находятся в интервале от 125 до 270 м. Профиль пересекает субвертикальную разломную зону на ПК 8 - 10. Разрез характеризуется высокой изменчивостью мощностей ММП, как по данным электротомографии, так и ЭМЗ-ВП. Мощность сплошной мерзлоты в среднем составляет от 50 до 70 м; общей от 100 до 130 м. Присутствуют межмерзлотные зоны с низкими значениями УЭС в интервале от 80 до 100 м. Подмерзлотные воды залегают в интервале от 100 до 300 м. Профиль пересекает две разломные зоны на ПК 3-6 и ПК 11-17 с углом падения около 30° на Ю-В. Описание результатов интерпретации по данным электротомографии, ЭМЗ-ВП и каротажа КС приведены в таблице 1.

Сопоставление данных ГИС, бурения и инверсии наземных электротомографии и ЭМЗ-ВП помогло получить следующие результаты:

а) по данным электротомографии на разрезах достаточно уверенно выделяются зоны развития «сплошной» мерзлоты, имеющие повышенные значения УЭС, что, в целом, соответствует данным каротажа сопротивлений. Разломные зоны отражаются на данных электротомографии пониженными УЭС, в ряде случаев надежно определяется наклон разрывного нарушения;

б) технология ЭМЗ-ВП позволила выделить тектонические нарушения северо-восточного направления, определить общую мощность многолетнемерзлых пород и наличие в них межмерзлотных вод, а также определить интервалы глубин залегания подмерзлотных вод, которые на данной площади находятся под подошвой «вялой» мерзлоты. По результатам инверсии по пониженным значениям УЭС высказано предположение о возможном наличии подмерзлотных вод на глубинах 100-200 и более м, что подтвердилось результатами бурения.

Признаком наличия многолетнемерзлых пород явилось повышенное сопротивление и радиоактивность пород (мерзлые глины и глинистые породы). По термометрии выделить зону ММП не удалось, так как при проведении работ все скважины самоизливались.

Признаками зоны повышенной трещиноватости являются как неровности стенок скважины, которые выделяются по кривым кавернометрии, так и наличие в трещинах низкопроводящей мерзлоты (повышенные значения сопротивлений, полученные методом КС).

Выводы

По комплексу геофизических методов были определены перспективные участки для бурения гидрогеологических скважин. Они связаны с зонами тектонических нарушений, имеющих повышенную проницаемость и емкостные свойства пород, что в дальнейшем подтвердилось результатами опытно-фильтрационных работ. Выделенные на этих перспективных участках продуктивные подмерзлотные водоносные горизонты предложены для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и использования их для производственных и технологических нужд объектов Озерного ГОКа. Горизонты межмерзлотных вод представляют собой линзы, не связанные с поверхностными надмерзлотными или подмерзлотными водами и не представляют практического интереса.

Благодарности

Авторы благодарны геологам Озерного ГОКа Булату Баировичу Намжилову и Андрею Викторовичу Красных за оперативную поддержку и сопровождение проекта, а так же главному гидрогеологу проекта Ларисе Ивановне Аузиной за работу, выполненную со страстью и профессионализмом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-67-47037 «Методологическое и программное обеспечение обработки больших объемов данных электромагнитных зондирований, гравиразведки и БПЛА-магниторазведки на основе комплексного решения трехмерных обратных задач рудной геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. – М.: Недра, 1970. – 432 с.

Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

Давыденко Ю.А., Попков П.А., Новопашина А.В. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в

традиционных методах постоянного тока // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 73–84.

Официальный сайт Геофизическое оборудование и услуги ООО «НПФ УГФ» [Электронный ресурс]. - Режим доступа свободный. - URL: http://ooougf.ru/index/skvazhinnye_pribory/0-23 (18.06.2021).

Официальный сайт GEODEVICE [Электронный ресурс]. - Режим доступа свободный. - URL: <https://geodevice.ru/main/electric/units/skala64> (18.06.2021).

Официальный сайт Zond Software [Электронный ресурс]. - Режим доступа свободный. - URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (18.06.2021).

Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М., Чернышев А. В., Рояк М. Э. «Об одном подходе к решению трехмерной обратной задачи электромагнитного зондирования Земли становлением поля», Сиб. журн. индустр. матем., 6:1 (2003), 138–153.

Cole, K.S. and R.H. Cole, 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. *Journal of Chemical Physics*, 6, 341-353.

Gorunov A., Kiselev E., I. Kondratiev, Safonov A., Tertyshnikov K. and Chernov V. The role of high-resolution electrical survey (HRES-IP) in complex of geophysical methods during exploration, prospecting and exploitation of oil and gas deposits. *European Association of Geoscientists & Engineers. Source: Conference Proceedings, Geophysics of the 21st Century - The Leap into the Future, Sep 2003*, pp-38-00297. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.38.F188>.

Shargorodsky A.V., Davydenko Y.A. & Nikulin S.V. Evaluation of the Sensitivity and Resolution of the Aero-Electromagnetic System DIP-4A Made for Uranium Deposit Model on Reagen Vitimsky Plateau // *GeoBaikal 2014*. Irkutsk, Russia, 18-22 August 2014.

Veeken, P., Legeydo, P., Davidenko, Y., Kudryavceva, E., Ivanov, S., Chuvaev, A. [2009]. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. (Vol. a). *Geophysics*, 74, 47-5

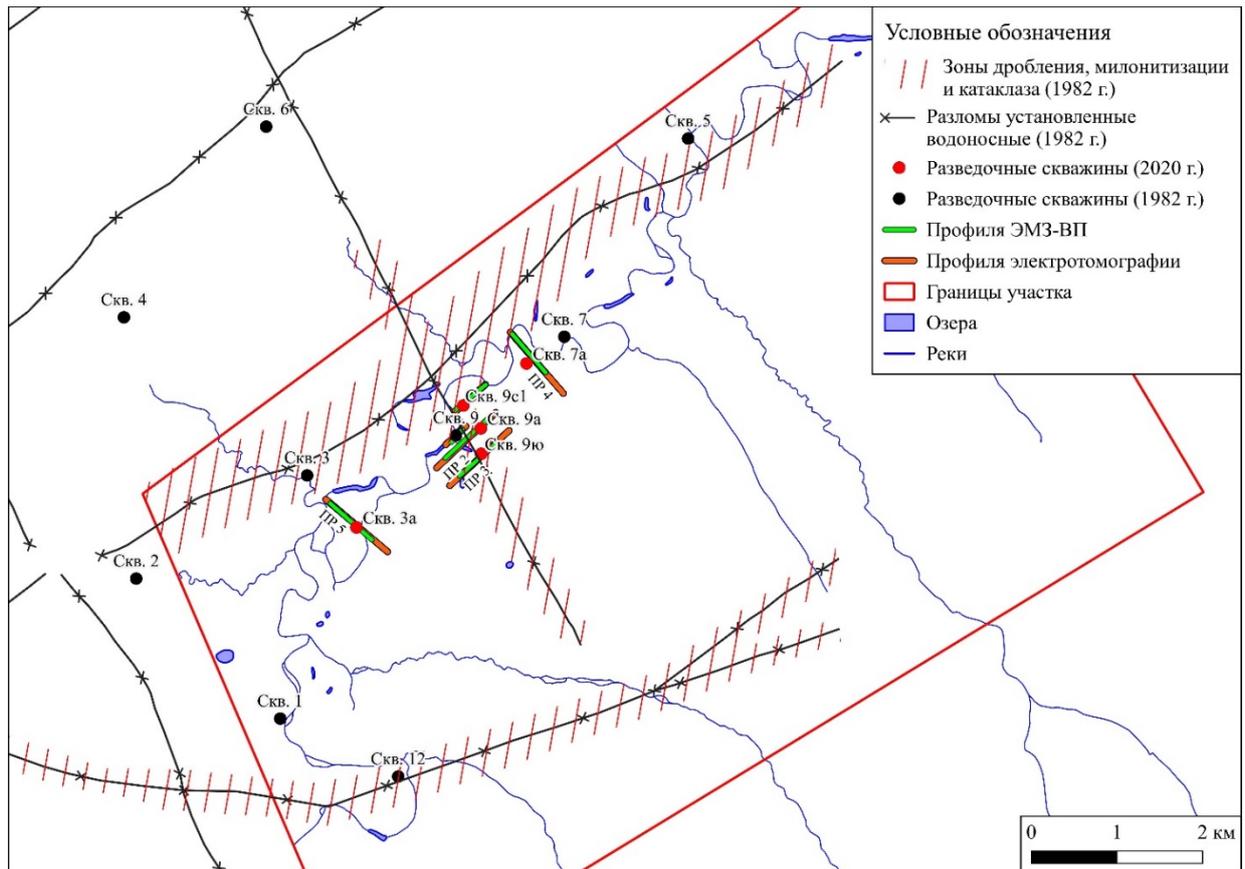


Рисунок 1. Схема участка работ.

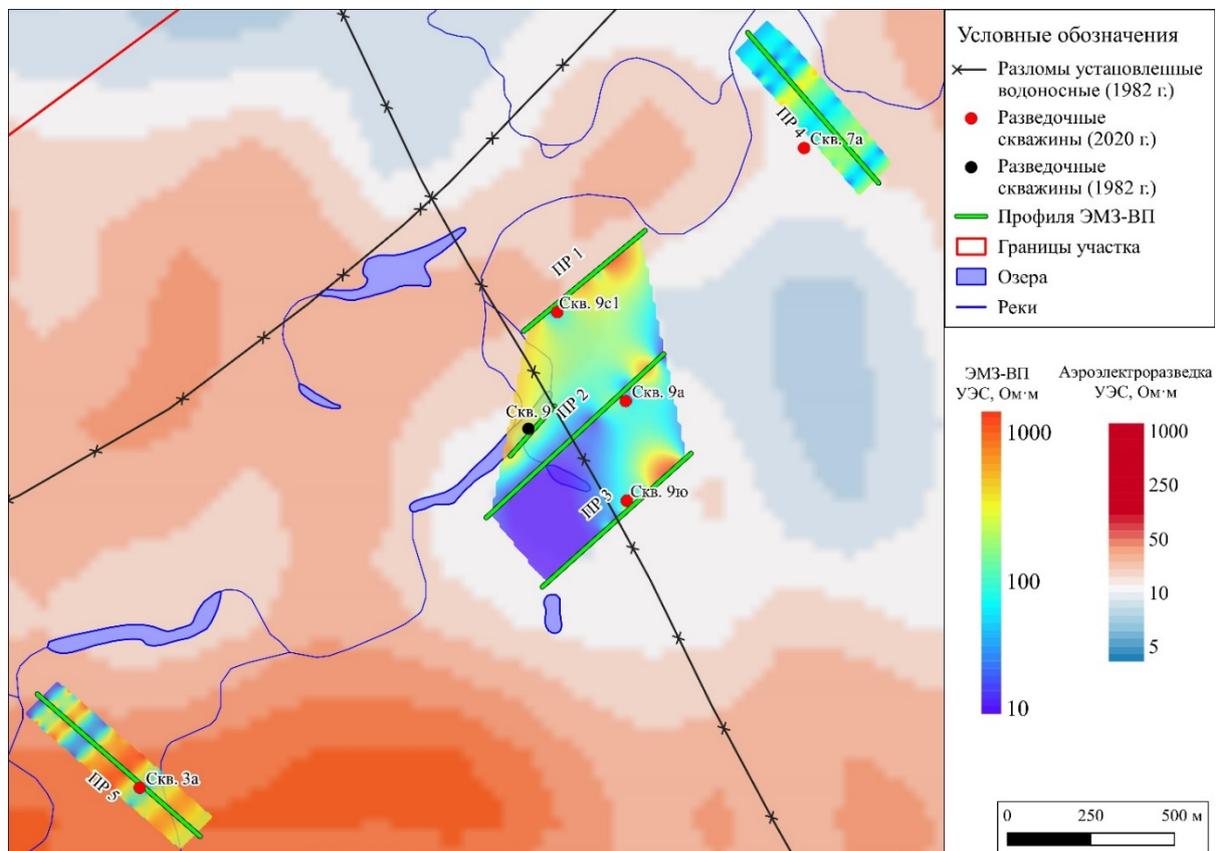


Рисунок 2. Карта УЭС на глубинах 100-125 м по данным ЭМЗ-ВП, наложенная на результат обработки данных аэроэлектроразведки на частоте 2080 Гц.

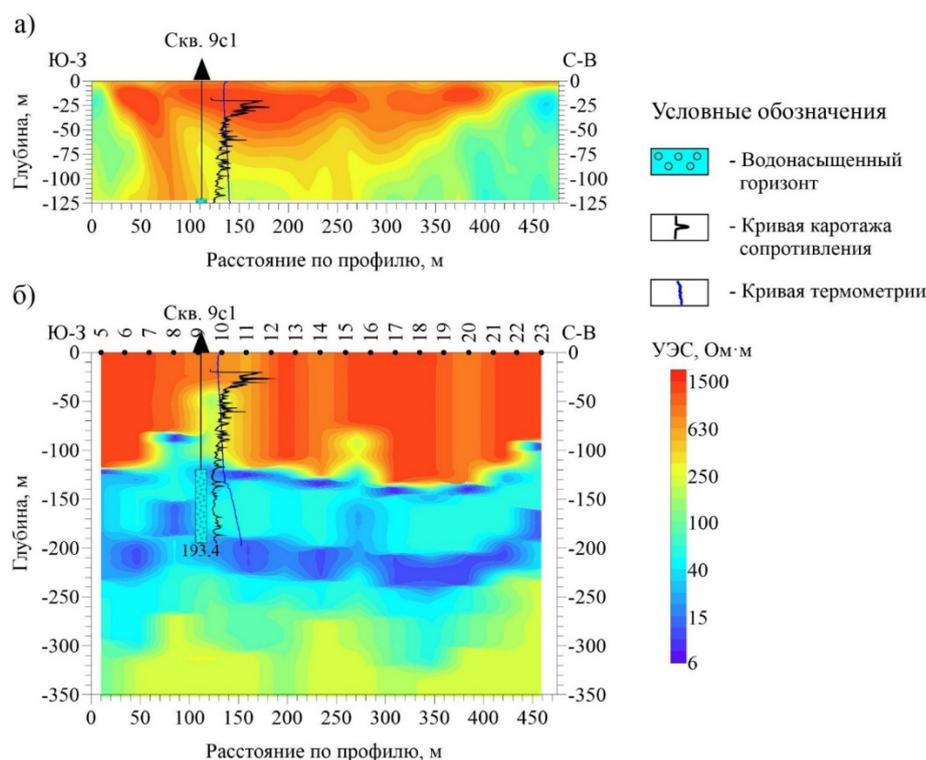


Рисунок 3. Разрез сопротивлений по данным: а) электротомографии и б) ЭМЗ-ВП по профилю 1.

ПР	Мощность сплошной мерзлоты (электротомография, каротаж, ЭМЗ-ВП), м	Общая мощность мерзлоты (ЭМЗ-ВП, каротаж), м	Интервал межмерзлотных вод (ЭМЗ-ВП, каротаж), м	Интервал подмерзлотного слоя повышенной проводимости (ЭМЗ-ВП, каротаж), м	Тектоническое нарушение/ его ориентировка
1	65	110-135	отсутствует	125-200 и более	Тектоническое нарушение на ПК 8-10 (протяженность 50 м)/ субвертикальная
2	25-50	90-120	30-50 (ПК 10-17, протяженность 175 м)	90-200 и более	Тектоническое нарушение (протяженность 150 м)/ субвертикальная
3	20-30	60-140 (в среднем около 100)	отсутствует	100-200 и более	Надежно не выделяется
4	50-70	100-130	80-100	100-200 и более	Два тектонические нарушения (протяженность 75 м и протяженность 150 м)/ угол падения 30 град на ЮВ
5	25-70	70-140 м. Мощность сильно изменяется по профилю (в среднем около 100 м)	мощности в пределах 20-30 м на интервалах 20-80 м. (ПК 7-20, протяженность 325 м)	70-200 и более	Два тектонических нарушения (протяженность 75 м и 125 м)/ субвертикальная
6	Около 50	По данным ЭМЗ-ВП 110 м	отсутствует	100-200 и более	Надежно не выделяется

Таблица 1. Описание результатов интерпретации разрезов сопротивлений