

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 550.837.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(3-12)

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ
В РАЗРЕЗЕ МЕРЗЛЫХ И ОХЛАЖДЕННЫХ ПОРОД
РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАСОЛЕННОСТИ****Д.А. Квон¹, И.Н. Модин², В.А. Шевнин², Д.В. Макаров², А.Д. Скобелев^{1,2}**¹ООО «НПЦ ГЕОСКАН», 119313, Москва, Ленинский просп., 95, Россия; kvonchik@rambler.ru²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Представлены результаты площадных исследований приповерхностной части криолитозоны в районе Харасавэйского газоконденсатного месторождения методом электротомографии. Совместное использование данных электротомографии и петрофизического моделирования удельного электрического сопротивления горных пород позволило распознать мерзлые и охлажденные породы разной степени засоления, выявить структурные особенности строения разреза. Предложена методика оценки концентрации порового раствора по данным удельных электрических сопротивлений.

Электротомография, петрофизическое моделирование, засоленные многолетнемерзлые породы, охлажденные породы

**ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY FOR IDENTIFICATION
OF FROZEN AND COOLED SALINE GROUND****D.A. Kvon¹, I.N. Modin², V.A. Shevnin², D.V. Makarov², A.D. Skobelev^{1,2}**¹Research Center Geoscan LLC, 95, Leninsky prosp., Moscow, 119313, Russia; kvonchik@rambler.ru²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

Shallow subsurface in the permafrost zone around the Kharasavei gas and condensate field in the Yamal Peninsula is studied by electrical resistivity tomography (ERT) to characterize the thermal state and salinity of ground. Resistivity patterns obtained by statistical processing of ERT data jointly with petrophysical modeling allow discriminating between ground of different salinities and imaging the section structure. A procedure is suggested to estimate the concentration of pore fluid salinity from resistivity data.

Electrical resistivity tomography, petrophysical modeling, saline permafrost, cooled ground

ВВЕДЕНИЕ

Территория Харасавэйского газоконденсатного месторождения (ГКМ) находится в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород [Баду, Подборный, 2006] с широким распространением засоленных мерзлых и охлажденных грунтов [Буданцева и др., 2006].

Присутствие солей в поровом растворе отложений существенно влияет на температуру замерзания и фазовый состав воды в них и, как следствие, на механические свойства мерзлых пород. Засоленность пород территории Харасавэйского ГКМ представляет собой одну из главных опасностей при эксплуатации скважин, фундаментов зданий и опор сооружений [Буданцева и др., 2006].

Сейчас метод электротомографии (ЭТ) получает все более широкое распространение при исследовании верхней части разреза криолитозоны в связи с высокой детальностью и производитель-

ностью данного метода инженерной электроразведки. В частности, ЭТ применяется для изучения состояния мерзлых пород как в горных районах [Hauck, 2002; Krautblatter et al., 2010], так и на арктическом побережье [Оленченко и др., 2015; Yoshikawa et al., 2006; Hubbard et al., 2013].

В то же время существуют малочисленные примеры исследования засоления мерзлых пород методом ЭТ [Ingeman-Nielsen et al., 2008; Dafflon et al., 2016] и состояния мерзлых пород с оценкой количества незамерзшей воды по данным ЭТ [Oldenborger et al., 2017].

На нескольких участках северо-западной части полуострова Ямал в пределах территории Харасавэйского ГКМ были выполнены геофизические исследования методом ЭТ с целью определения мерзлотно-геологического строения приповерхностной части разреза и изучения засоленных горных пород.

Геоморфологическое и геологическое описание участков исследования

Положение участков представлено на карте фактического материала работ (рис. 1). На карту вынесены границы геолого-геоморфологических комплексов [Подборный, 2006].

Первые два участка расположены в пределах третьей морской террасы $mIII_{2-3}$ с абсолютными отметками 20–22 м. По данным бурения на участке 1, верхние 10–12 метров разреза сложены суглинками линзовидно-слоистой криогенной текстуры, до глубины 30 м залегают пески с массивной криогенной текстурой и ниже, до глубины 50 м, находятся суглинки с массивной криогенной текстурой. На участке 2 верхние 10 метров разреза сложены суглинками с преимущественно линзовидно-слоистой криогенной текстурой, до глубины 35 м залегают пески с массивной криогенной текстурой, до глубины 50 м разрез представлен переслаивающимися суглинками и супесями с массивной криогенной текстурой.

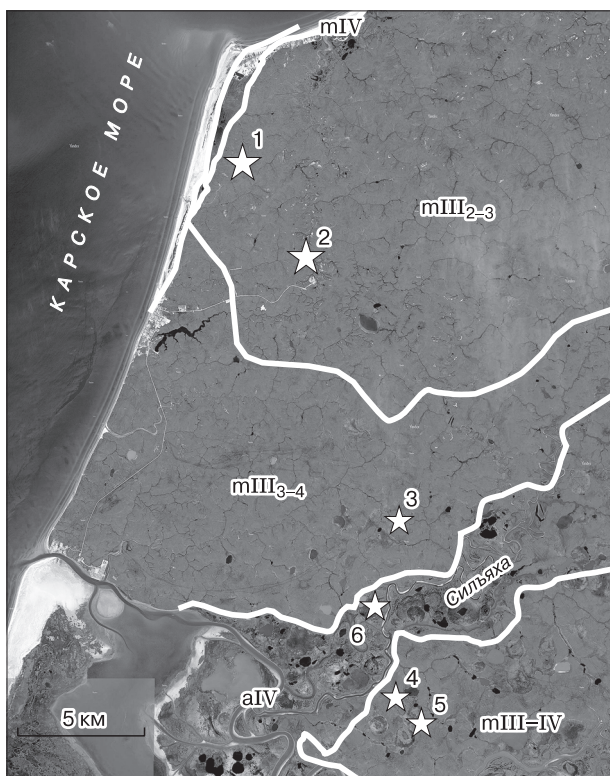


Рис. 1. Карта фактического материала исследований с элементами геоморфологической карты.

1–6 – номера исследованных участков. Верхнечетвертичные морские отложения (суглинки, глины, пески, супеси): $mIII_{2-3}$ – III терраса, абс. высота 20–22 м; $mIII_{3-4}$ – II терраса, абс. высота 12 м; $mIII-IV$ – голоценовые, I терраса, абс. высота 10–12 м. Голоценовые отложения: mIV – морские отложения лайд (пески, суглинки, глины); aIV – аллювиальные отложения пойм (пески, супеси оторфованные).

Третий участок расположен на второй морской террасе $mIII_{3-4}$, абсолютная высота 12 м. В соответствии с данными бурения верхние 10 метров разреза сложены суглинками с линзовидно-слоистой криогенной текстурой, песками с массивной криогенной текстурой до глубины 23–25 м и суглинками с массивной криогенной текстурой до глубины 50 м.

Четвертый и пятый участки расположены в пределах первой морской террасы ($mIII-IV$), абсолютная высота 10–12 м. По данным параметрического бурения, разрез до глубин 5–8 м сложен суглинками с преимущественно линзовидно-слоистой криогенной текстурой, далее до глубин 12–15 м залегают пески с массивной криогенной текстурой, и до глубины 50 м разрез представлен суглинками с массивной и шлировой криогенными текстурами и редкими прослоями песка и супесей. По данным инженерного бурения, в верхней части разреза (глубина скважин до 13 м) наблюдается постепенное увеличение засоленности грунтов, с глубин 4–8 м появляются сильнозасоленные грунты.

Шестой участок исследований находится в пойме р. Сильяха с абсолютными отметками 2 м. По данным инженерных скважин, разрез до глубины 13 м представлен суглинками и супесями разной степени льдистости, с глубиной наблюдается постепенное увеличение засоленности грунтов, на глубинах 7–10 м встречены криопэги.

С помощью ЭТ разрез был изучен на глубину до 50 м.

Методика электротомографии

Площадная съемка методом электротомографии выполнялась с помощью станции Омега-48 (производство ООО «Логис», г. Раменское [http://www.geotech.ru]) в технике roll-along – последовательного перекалывания измерительных кос с перекрытием сегментов. Использовалась комбинированная трехэлектродная установка $A_{mn} + + m_{nV}$. Шаг между электродами составлял 5 м с максимальным разносом 212.5 м. Количество профилей и их протяженность варьировали в зависимости от размеров исследуемых участков: до 720 м на коротких и до 1680 м на длинных. Расстояние между профилями составляло 50 м.

Анализ данных, полученных методом электротомографии

Подготовка и предварительная обработка данных, полученных методом ЭТ, производилась в программе X2IP1 (разработчик А.А. Бобачев) [http://x2ipi.ru], инверсия разрезов выполнялась в программе ZondRes2D [Каминский и др., 2016]. Карты удельных электрических сопротивлений (УЭС) строились по данным 2D-инверсии с интерполяцией.

Один из этапов обработки данных электротомографии – представление выборок УЭС после инверсии соответствующих величин в виде гистограмм по отдельным участкам. Гистограммы учитывают логнормальный закон распределения сопротивлений (рис. 2), поэтому интервалы гистограмм имеют одинаковую ширину в логарифмических координатах. Были рассчитаны также характерные кривые вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) по участкам.

В общем случае (не учитывается слой сезонного протаивания) каждый из разрезов имеет многослойную геоэлектрическую структуру.

На участке 1 разрез характеризуется сопротивлением в диапазоне от 100 до 10 000 Ом·м с пиком в области 7000–9000 Ом·м и широким пиком в области 600–3000 Ом·м. Характерная кривая ВЭЗ – А (см. рис. 2), это означает, что в трехслойном разрезе наблюдается последовательное повышение значений УЭС с глубиной. Инверсия данных электротомографии по типичному разрезу первого участка показывает наличие тонких про-

водящих слоев с УЭС около 400–500 Ом·м в приповерхностной части (см. рис. 2).

На участке 2 основная часть УЭС по гистограмме находится в диапазоне 100–8000 Ом·м с пиками в интервалах 300–3000 и 6000–7000 Ом·м. Характерная кривая ВЭЗ – К (тип “трехслойной” кривой, у которой средний слой имеет максимальное значение УЭС). Разрез по данным ЭТ характеризуется почти повсеместно распространенным высокоомным слоем с локальными областями пониженных УЭС в приповерхностной зоне и частичным выходом на проводящее основание с УЭС около 100 Ом·м.

Участок 3 обладает УЭС в диапазоне от 100 до 9000 Ом·м с отчетливым пиком при 1000–2000 Ом·м и слабовыраженным максимумом в области 200 Ом·м. Характерная кривая ВЭЗ – К (см. рис. 2). На типичном разрезе ЭТ наблюдается высокоомная толща, локально разделенная проводящими телами в приповерхностной части, в нижней части разреза всюду наблюдается выход на проводящее основание с УЭС примерно 100–200 Ом·м.

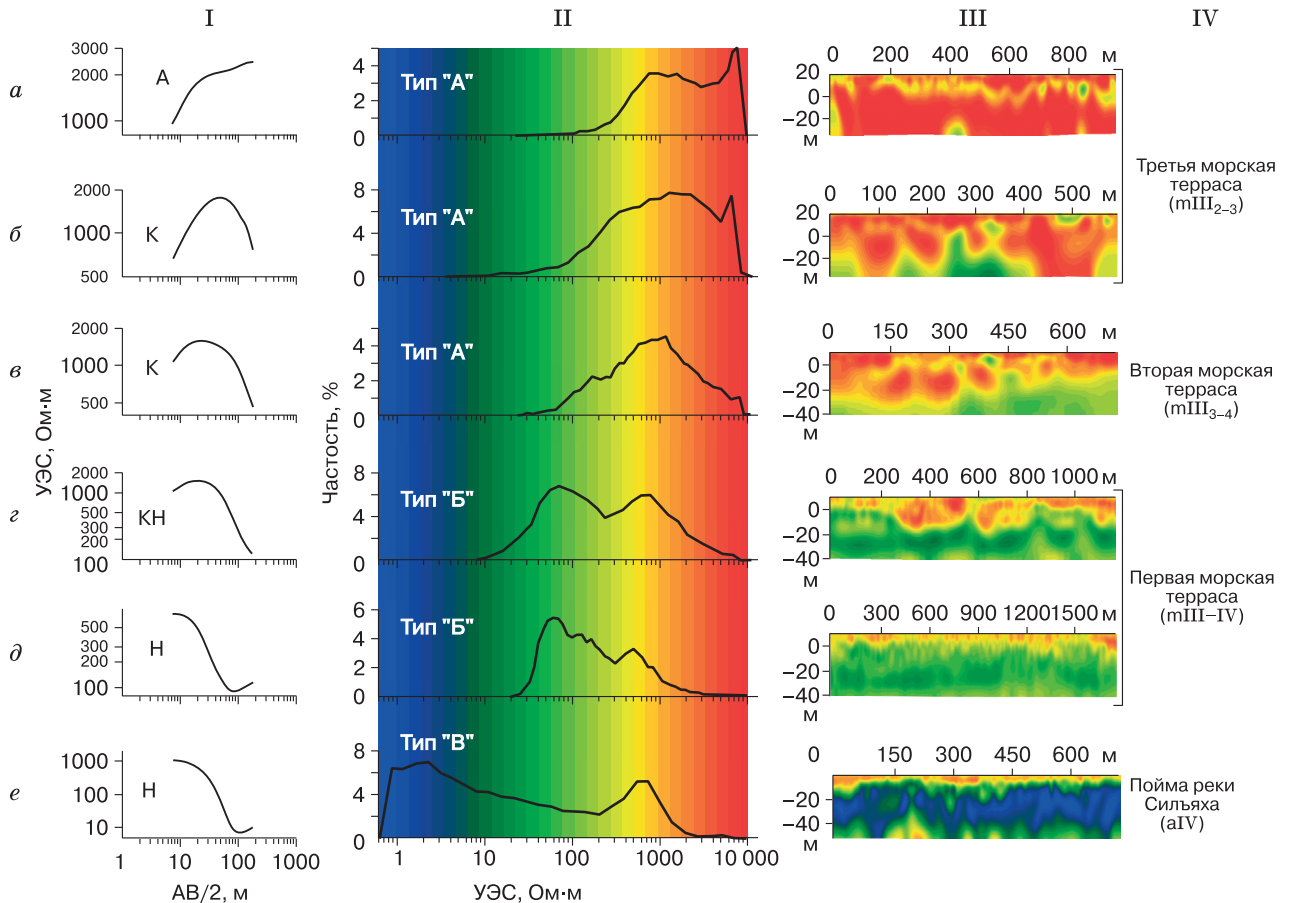


Рис. 2. Осредненные кривые ВЭЗ (I), гистограммы УЭС (II), разрезы УЭС (III) по данным ЭТ и приуроченность участков исследований к геоморфологическим уровням (IV).

a–e – участки 1–6 соответственно; АВ/2 – полуразнос. Рисунки приведены в единой цветовой шкале УЭС с гистограммами.

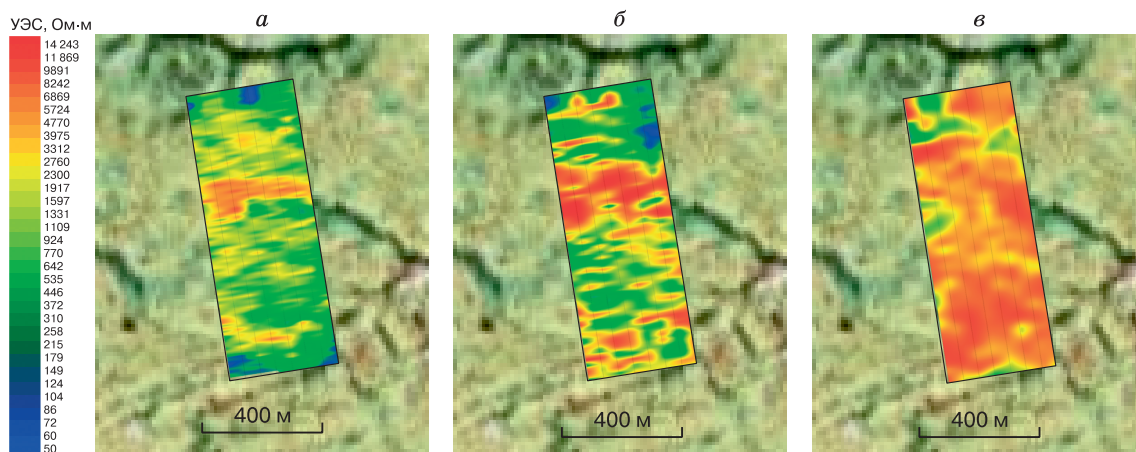


Рис. 3. Пространственное распределение УЭС на разных глубинах по участку 1:
а – 1.5 м; *б* – 6 м; *в* – 16 м.

Участок 4 характеризуется общим диапазоном УЭС в интервале от 10 до 10 000 Ом-м с ярко выраженными пиками 60 и 600 Ом-м. Характерная кривая ВЭЗ – КН (тип “четырёхслойной” кривой, где второй слой обладает максимальными, а третий – минимальными значениями УЭС). Типичный разрез представлен высокоомным слоем переменной мощности с проводящими неоднородностями в приповерхностной части, ниже по разрезу залегает проводящий слой с УЭС около 60 Ом-м и далее разрез плавно переходит к основанию с УЭС 50–60 Ом-м.

Для участка 5 представительная часть гистограммы находится в интервале 30–3000 Ом-м с несколькими пиками: 60, 100–200 и 500–600 Ом-м. Характерная кривая ВЭЗ – Н (тип “трехслойной” кривой ВЭЗ с минимальным значением УЭС во втором слое). На профиле электротомографии на-

блюдается относительно выдержанные по горизонтали слои: высокоомный тонкий слой 600–2000 Ом-м, который затем сменяется проводящим слоем 60 Ом-м, и далее разрез выходит на основание с ростом УЭС до 100–200 Ом-м.

Участок 6 обладает широким разбросом УЭС в интервале 0.6–2000 Ом-м с выраженными пиками при 0.9–4 и 500–700 Ом-м. Характерная кривая ВЭЗ – Н (см. рис. 2). На профиле ЭТ видно, как высокоомный слой контрастно сменяется проводящим и далее выходит на основание с повышением сопротивления.

По диапазону сопротивлений участка можно условно разделить на три типа. Тип “А” представляет собой такой разрез ЭТ, при котором гистограммы сопротивлений УЭС ограничены диапазоном от 100 до 10 000 Ом-м (см. рис. 2, *а–в*). На гистограммах УЭС могут проявляться два отчет-

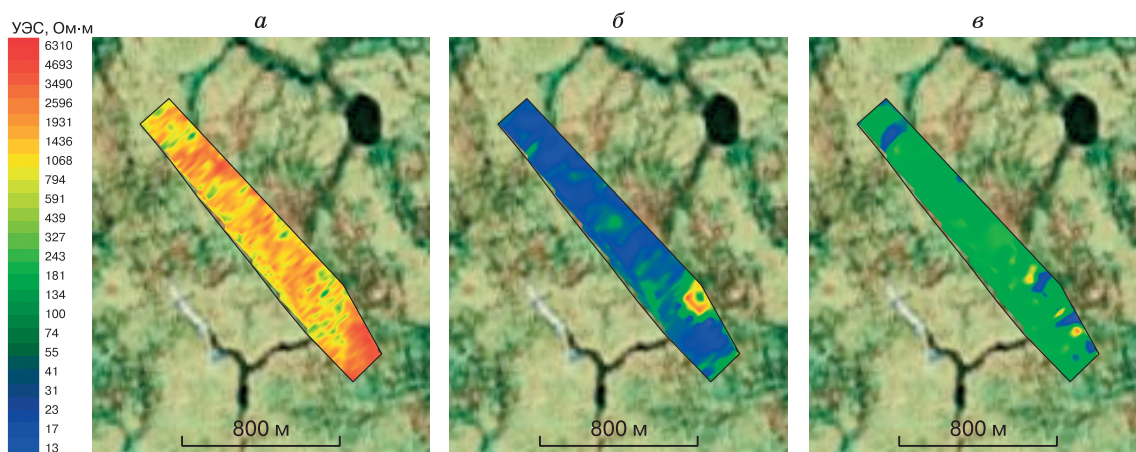


Рис. 4. Пространственное распределение УЭС на разных глубинах по участку 5:
а – 3 м; *б* – 24 м; *в* – 54 м.

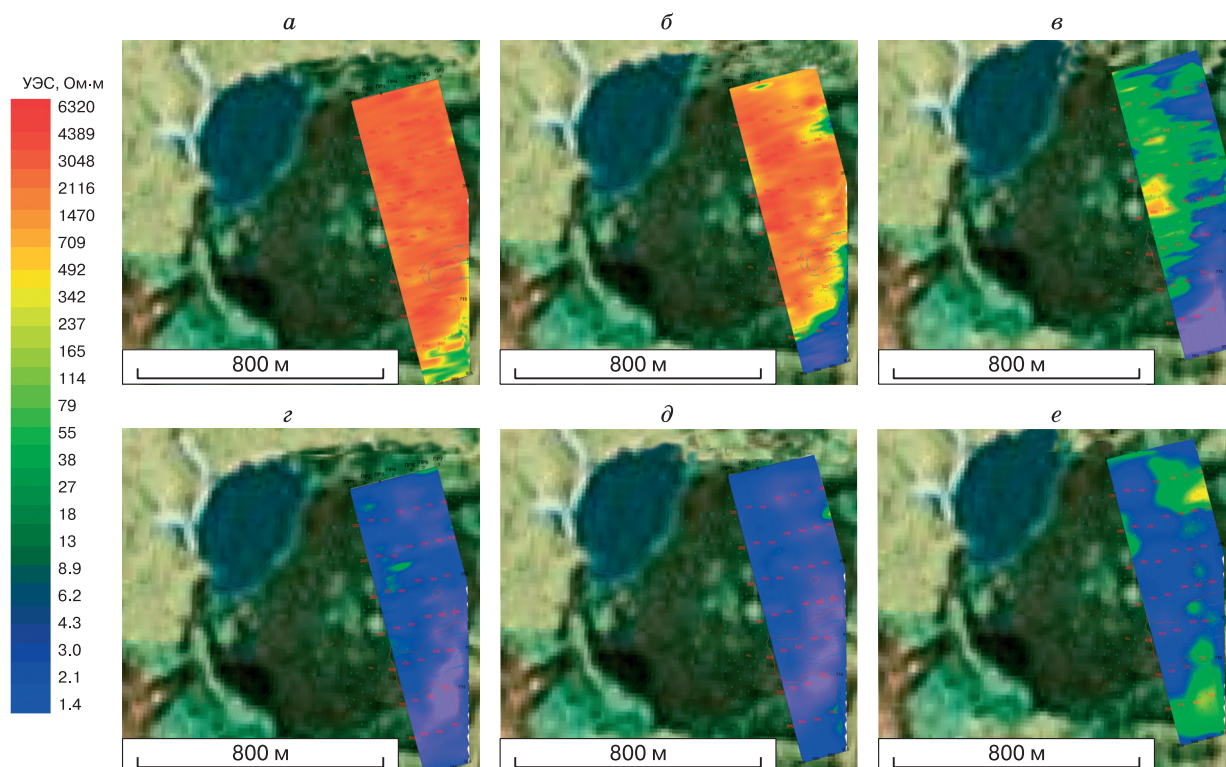


Рис. 5. Пространственное распределение УЭС на разных глубинах по участку б:

а – 2 м; б – 5 м; в – 10 м; з – 15 м; д – 20 м; е – 35 м.

ливых пика распределения. Тип гистограмм “А” приурочен к верхнечетвертичным морским отложениям III и II морских террас. Пример пространственного распределения удельных электрических сопротивлений на участке 1 такого типа проиллюстрирован на рис. 3.

Для участков типа “Б” характерны гистограммы с более широким диапазоном УЭС – от 10 до 10 000 Ом·м, видны два отчетливых максимума распределений. Данный тип гистограмм выявлен в верхнечетвертичных отложениях I морской террасы. На рис. 4 приведено пространственное распределение УЭС на различных глубинах участка 5 соответствующего типа.

Для участка типа “В” характерны гистограммы с диапазоном изменения УЭС в области значений от 0.6 до 2000 Ом·м, с двумя максимумами распределений. Тип гистограммы “В” выявлен в голоценовых аллювиальных отложениях поймы. На рис. 5 представлены распределения по глубине для такого участка. Следует отметить, что участок исследований частично расположен в котловине хасыря и промерзающий несвязной галик, сформировавшийся за время существования озера, вероятно, выражается в контрастном и слоистом распределении УЭС с глубиной.

Петрофизическое моделирование удельного электрического сопротивления пород

Петрофизическое моделирование удельного электрического сопротивления горных пород выполнялось в программе PetroWin (разработчик А.А. Рыжов), в которой по заданным водно-физическим характеристикам можно рассчитать УЭС бинарной песчано-глинистой смеси [Матвеев, Рыжов, 2006].

Если поровый раствор в мерзлых горных породах минерализован, то температура замерзания раствора понижается и в порах остается свободная незамерзшая вода [Якунов, 2008]. Электропроводность мерзлых пород обуславливается минерализацией порового раствора за счет содержания солей [Дахнов, 1953]. В теоретических расчетах УЭС пород учитывалось влияние таких параметров, как температура, размер глинистых и песчаных частиц, ионно-обменная емкость глинистого компонента, влажность, пористость, засоление и объем порового раствора.

Из предоставленных заказчиком данных и литературы [Бадю и др., 2006] известно, что значения температур многолетнемерзлых пород на участках ЭТ в пределах исследуемых глубин (за исключением верхних 5 метров) находятся в диа-

Петрофизические свойства образцов

Номер	Описание образца грунта	D_{sal}	W_{tot}	n	I_{tot}	UWC
1	Глина мерзлая, сильнольдистая, незасоленная	0.11	60	69	59	1
2	Суглинок мерзлый, сильнольдистый, незасоленный	0.09	61	71	60	1
3	Суглинок мерзлый, льдистый, незасоленный	0.12	47	58	43	4
4	Суглинок мерзлый, слабольдистый, незасоленный	0.11	33	50	28	5
5	Глина мерзлая, льдистая, слабозасоленная	0.20	50	57	44	6
6	Глина мерзлая, слабольдистая, незасоленная	0.17	43	50	35	8
7	Глина мерзлая, льдистая, слабозасоленная	0.36	50	57	40	10
8	Глина мерзлая, слабольдистая, слабозасоленная	0.29	43	50	30	13
9	Глина мерзлая, льдистая, средnezасоленная	0.53	48	65	32	16
10	Глина мерзлая, слабольдистая, средnezасоленная	0.52	45	51	24	21
11	Супесь мерзлая, слабольдистая, средnezасоленная	0.41	37	44	10	27
12	Супесь мерзлая, слабольдистая, средnezасоленная	0.36	37	44	14	23
13	Глина мерзлая, нельдистая, слабозасоленная	0.32	37	43	16	21
14	Глина мерзлая, слабольдистая, слабозасоленная	0.29	43	50	30	13
15	Глина мерзлая, слабольдистая, слабозасоленная	0.29	43	50	30	13
16	Глина мерзлая, льдистая, незасоленная	0.18	49	59	44	5
17	Суглинок мерзлый, слабольдистый, незасоленный	0.11	42	50	36	5
18	Глина мерзлая, льдистая, незасоленная	0.12	49	59	46	3
19	Глина мерзлая, сильнольдистая, незасоленная	0.15	60	69	58	2
20	Суглинок мерзлый, льдистый, незасоленный	0.05	47	58	45.5	1.5
21	Суглинок мерзлый, сильнольдистый, незасоленный	0.11	62	73	61	1
22	Суглинок мерзлый, очень сильнольдистый, незасоленный	0.12	70	79	69	1
23	Супесь мерзлая, слабольдистая, незасоленная	0.08	39	46	37	2
24	Суглинок мерзлый, сильнольдистый, слабозасоленный	0.20	60	68	57	3
25	Суглинок мерзлый, льдистый, незасоленный	0.12	47	58	45	2
26	Суглинок мерзый, слабольдистый, незасоленный	0.11	41	50	36	5
27	Суглинок мерзый, льдистый, слабозасоленный	0.28	51	60	44	7
28	Глина мерзлая, слабольдистая, слабозасоленная	0.29	34	50	21	13
29	Суглинок мерзый, льдистый, средnezасоленный	0.57	48	55	31	17
30	Суглинок мерзый, слабольдистый, слабозасоленный	0.28	41	48	26	15
31	Суглинок мерзый, слабольдистый, средnezасоленный	0.76	41	47	1	40
32	Суглинок мерзый, слабольдистый, сильнозасоленный	0.99	44	48	1	43
33	Суглинок текучепластичный	–	44	44	–	–
34	Песок пылеватый, мерзлый, льдистый, незасоленный	0.03	39	43	37	2
35	Песок средней крупности, мерзлый, льдистый, слабозасоленный	0.06	40	47	37	3
36	Песок пылеватый, мерзлый, льдистый, слабозасоленный	0.09	39	44	33	6
37	Песок пылеватый, мерзлый, льдистый, слабозасоленный	0.10	34	42	27	7
38	Песок пылеватый, мерзлый, льдистый, средnezасоленный	0.19	39	44	28	11
39	Песок пылеватый, мерзлый, слабольдистый, средnezасоленный	0.19	33	43	19	14
40	Песок пылеватый, мерзлый, льдистый, сильнозасоленный	0.64	42	46	9	33
41	Песок пылеватый	–	37	40	–	–

Примечание. D_{sal} – степень засоления, %; W_{tot} – суммарная влажность, об.%; n – пористость, об.%; I_{tot} – суммарная льдистость, об.%; UWC (unfrozen water content) – содержание незамерзшей жидкости, об.%.

пазоне от -4 до -5.5 °С. На участках 4–6 были известны значения таких параметров, как степень засоления, суммарная влажность, пористость, суммарная льдистость (см. таблицу), плотность скелета грунта и другие параметры, на основании которых вычислялись теоретические зависимости УЭС от концентрации порового рас-

твора NaCl (C_{ps} , г/л) для образцов с участков 4–6 (рис. 6).

По значениям объема порового раствора было рассчитано соответствующее значение УЭС (ρ , Ом·м) на графике для выбранного образца горной породы. Таким образом было получено множество из 41 точки, которые далее аппроксимиро-

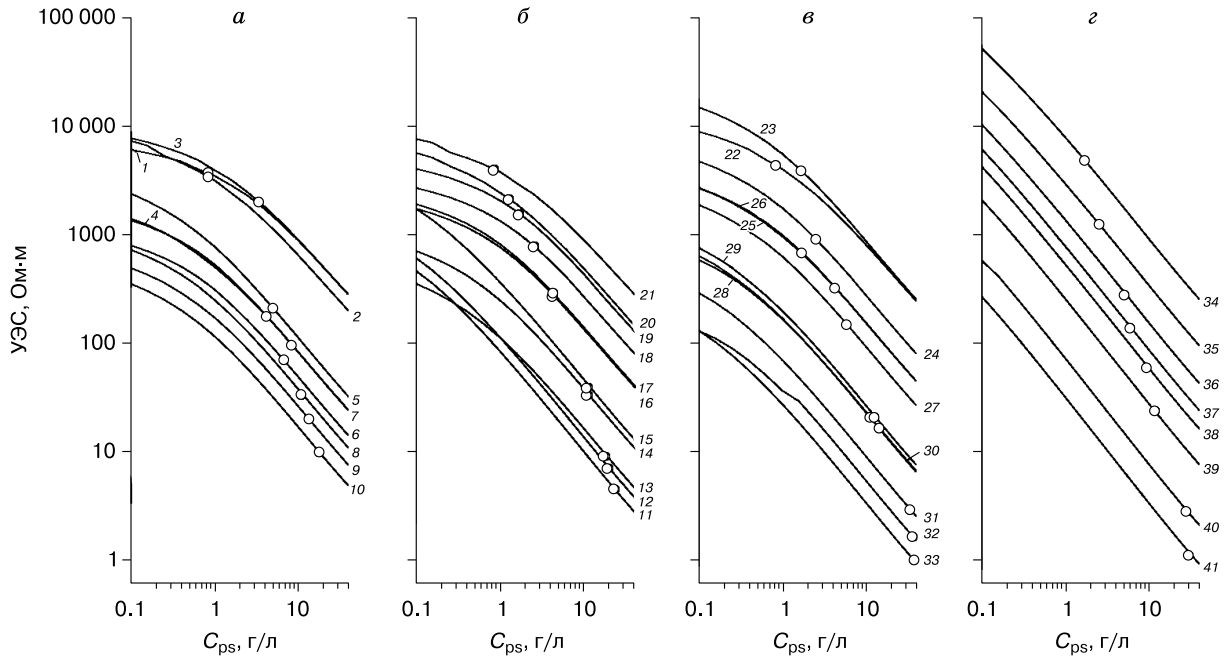


Рис. 6. Теоретические зависимости УЭС от концентрации порового раствора (C_{ps}) для образцов с участков 4–6.

a – участок 5; *б* – участок 4; *в* – участок 6; *г* – участки 4, 6. Точки на графиках – вычисленные УЭС образца при фиксированном объеме порового раствора, 1–41 – номер образца из таблицы.

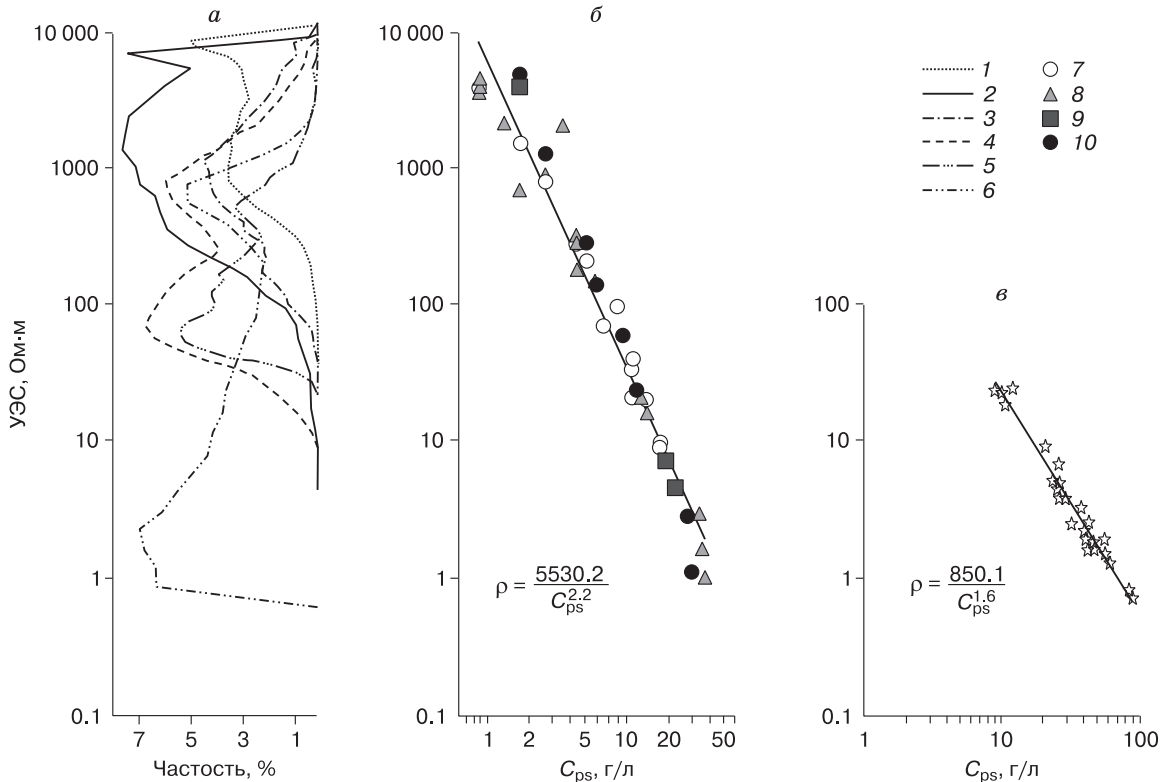


Рис. 7. Гистограммы УЭС по участкам исследований (*a*), вычисленные значения УЭС по формуле Зыкова (*б*), данные Зыкова по образцам пород Ямала, насыщенных раствором NaCl при -5°C (*в*), и аппроксимация указанной формулой (сплошная линия).

1–6 – участки 1–6; 7 – глины, 8 – суглинки, 9 – супеси, 10 – пески.

вались зависимостью типа $\rho = A/C_{ps}^b$. Данная зависимость ранее была предложена Ю.Д. Зыковым [2007] для описания универсальной взаимосвязи УЭС и концентрации порового раствора, где коэффициенты A и b при температуре -5°C равны 1400 и 1.85 соответственно. В данном случае для пород на площадках 4–6 подобраны коэффициенты $A = 5530.2$ и $b = 2.2$, наилучшим образом аппроксимирующие наши данные (рис. 7). Для сравнения приведены зависимости УЭС от концентрации порового раствора пород Ямала по данным Ю.Д. Зыкова [2007] для образцов суглинков и песков, насыщенных растворами преимущественно хлоридного

состава с коэффициентами $A = 850.1$ и $b = 1.6$. Различия этих значений обусловлено разными районами исследований и глубинами отбора образцов, поэтому для каждого района нужно калибровать формулу в соответствии с текущими физическими и геологическими характеристиками района.

На рис. 7 приведены гистограммы УЭС по участкам для соотнесения с подобранной зависимостью удельного электрического сопротивления от концентрации порового раствора. В целом выборка образцов охватывает все значения сопротивления, полученные по данным ЭТ. В область графика с низкими концентрациями порового раствора в основном попали образцы с высокими значениями суммарной льдистости (см. рис. 6, 7, таблицу). При концентрациях 30–40 г/л есть две точки, соответствующие образцам охлажденных пород (образцы № 33, 41). Выборка образцов пород по льдистости, степени засоления и влажности считается достаточной для соотнесения с полученными гистограммами УЭС, и далее зависимость $\rho = 5530.2/C_{ps}^{2.2}$ применяется для всех участков, изученных методом электротомографии.

Соответствующие значения коэффициентов, полученных в пределах участков 4–6, предлагается использовать для оценки концентрации поровых растворов пород до исследуемых методом ЭТ глубин (до 50 м). По формуле $C_{ps} = (5530.2/\rho)^{0.45}$ геоэлектрический разрез пересчитывается в разрез распределения концентраций поровых растворов по глубине (рис. 8). Таким образом, по данным ЭТ осуществляются интерполяция свойств, известных из результатов инженерного бурения (глубинность инженерных скважин до 13 м), и экстраполяция на глубину до 50 м.

Полученные распределения концентраций поровых растворов (см. рис. 8), пересчитанные на основе соответствующих разрезов УЭС, указывают на неоднородное распределение данного параметра по глубине на каждом участке. В общем случае для участков типа “А” концентрация поровых растворов не превышает 3 г/л в верхней части разреза и доходит до 8–10 г/л в нижней. Участки типа “В” характеризуются концентрациями до 6 г/л в верхних горизонтах, затем концентрации возрастают до 10–11 г/л и уменьшаются до 6 г/л в некоторых частях основания разреза. Согласно данным инженерных скважин, в верхней части разреза наблюдается постепенное увеличение засоленности грунтов с глубиной, а на глубинах 4–8 м появляются сильнозасоленные грунты. В данном случае область перехода к сильнозасоленным грунтам совпадает с градиентом изменения концентраций поровых растворов по данным ЭТ. Для участка типа “В” характерен тонкий приповерхностный слой с низкими концентрациями поровых растворов, далее по разрезу наблюдается градиентный скачок концентраций до 40 г/л, при-

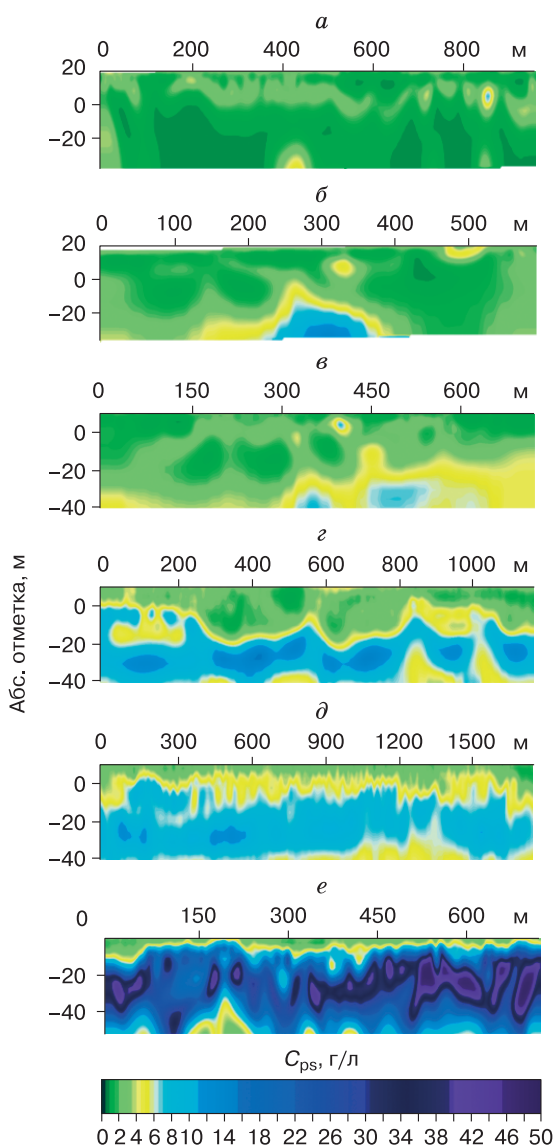


Рис. 8. Пространственное распределение концентрации порового раствора, рассчитанной на основе разрезов УЭС по формуле $C_{ps} = (5530.2/\rho)^{0.45}$.

a – участок 1, тип “А”; $б$ – участок 2, тип “А”; $в$ – участок 3, тип “А”; $г$ – участок 4, тип “В”; $д$ – участок 5, тип “В”; $е$ – участок 6, тип “В”.

существуют области со значениями 45–50 г/л. Согласно данным инженерных скважин, с увеличением глубины наблюдается рост засоленности грунтов, а на глубинах 7–10 м были встречены криопэги. В основании разреза концентрации уменьшаются до 10–20 г/л.

Известно, что для засоленных мерзлых пород удельное электрическое сопротивление определяется не литологическим составом, а концентрацией порового раствора [Зыков, 2007], что подтверждается данными моделирования УЭС на образцах (см. рис. 6, 7, таблицу). В этом случае нельзя произвести расчленение разрезов по составу отложений, используя результаты электротомографии.

ВЫВОДЫ

По данным электротомографии был выявлен широкий диапазон изменения УЭС в породах верхней части разреза Харасавэйского ГКМ – от 0.6 до 10 000 Ом·м.

Участки исследований типизированы по диапазонам и модальным значениям УЭС на гистограммах и соотнесены с геоморфологическими условиями: для участков, расположенных в пределах третьей и второй морских террас. В общем случае УЭС изменяется на два порядка – от 100 до 10 000 Ом·м с двумя пиками на гистограммах. Для участков на первой морской террасе диапазон УЭС расширяется до 10–10 000 Ом·м с двумя различными модами, для участка, расположенного в пойме р. Сильяха, диапазон УЭС составляет от 0.6 до 2000 Ом·м с широко разнесенными модами, что предположительно связано с наличием криопэгов в разрезе.

Подтверждено, что УЭС пород верхней части разреза в пределах Харасавэйского ГКМ можно аппроксимировать зависимостью типа $\rho = A/C_{ps}^b$ [Зыков, 2007]. Использование петрофизического моделирования УЭС при интерпретации данных ЭТ позволило установить, что значения соответствующих коэффициентов в формуле Зыкова равны $A = 5530.2$, $b = 2.2$ при температуре горных пород от -4 до -5.5 °С и литологическом разнообразии от глин и суглинков до супесей и песков.

Полученная зависимость УЭС от концентрации порового раствора, базирующаяся на петрофизическом подходе, позволяет выполнять обоснованный пересчет распределений удельных электрических сопротивлений в распределения концентраций поровых растворов на участках в пределах выбранных геоморфологических уровней Харасавэйского ГКМ.

Предлагаемая количественная оценка концентрации порового раствора может помочь в исследовании свойств мерзлых грунтов, оценке эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне, изучении территорий с засоленными отложениями.

Литература

- Бадю Ю.Б.** Лдыстость пород криогенной толщи газоносных структур северного Ямала // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 3, с. 10–19.
- Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Подборный Е.Е.** Распространение и температура мерзлых пород в пределах территории // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. СПб., Недра, 2006, т. 1, с. 84–89.
- Бадю Ю.Б., Подборный Е.Е.** Типизация мерзлых толщ по особенностям строения их разрезов и районирование по сложности геокриологических условий для сооружения и эксплуатации скважин // Там же, с. 289–300.
- Буданцева Н.А., Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Подборный Е.Е.** Засоленность пород // Там же, с. 145–167.
- Дахнов Н.В.** Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. М., Гостоптехиздат, 1953, 692 с.
- Зыков Ю.Д.** Геофизические методы исследования криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.
- Каминский А.Е., Ерохин С.А., Полицина А.В.** Тотальная инверсия данных малоглубинных геофизических исследований // Инж. изыскания, 2016, № 9, с. 44–51.
- Матвеев В.С., Рыжов А.А.** Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований // Разведка и охрана недр, 2006, т. 2, с. 50–57.
- Оленченко В.В., Сеницкий А.И., Антонов Е.Ю. и др.** Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования “Ямальский кратер” // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 94–106.
- Подборный Е.Е.** Геоморфологическая обстановка // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. СПб., Недра, 2006, т. 1, с. 38–48.
- Якупов В.С.** Геофизика криолитозоны. Якутск, Изд-во Якут. ун-та, 2008, 342 с.
- Dafflon B., Hubbard S., Ulrich C. et al.** Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region // Geophysics, 2016, vol. 81, p. WA247–WA263.
- Hauck C.** Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography // Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, No. 21, p. 1–4.
- Hubbard S.S., Gangogadagamage C., Dafflon B. et al.** Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets // Hydrogeol. J., 2013, vol. 21, p. 149–169.
- Ingeman-Nielsen T., Foged N., Butzbach R., Jørgensen A.S.** Geophysical investigation of saline permafrost at Ilulissat, Greenland // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost, Univ. of Alaska, Fairbanks, USA, 2008, vol. 1, p. 773–778.
- Krautblatter M., Verleysdonk S., Flores-Orozco A., Kemna A.** Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps) // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2010, vol. 115, No. F2, p. 1–15.
- Oldenborger G.A., LeBlanc A.-M.** Time-lapse electrical resistivity surveys and unfrozen water content in cold continuous permafrost // Proc. of the 17th Near Surface Geosci. Conf., EAGE (3–7 Sept. 2017). Malmo, Sweden, Tu 23 B11, p. 1–5.
- Yoshikawa K., Leuschen C., Ikeda A. et al.** Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice) // J. Geophys. Res.: Planets, 2006, vol. 111, No. E06S19, p. 1–10.
- URL: <http://www.geotech.ru> (дата выставления: 03.04.2003, дата обращения: 01.05.2011).
- URL: <http://x2ipi.ru> (дата выставления: 22.10.2012, дата обращения: 01.09.2013).

References

- Badu Yu.B. Ice content of cryogenic strata (permafrost interval) in gas-bearing structures, Northern Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 3, p. 9–18.
- Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Podbornyi E.E. Distribution and temperatures of permafrost. In: *Permafrost of Oil-Gas-Condensate Fields in the Yamal Peninsula*. Saint Petersburg, Nedra, 2006, vol. 1, p. 84–89 (in Russian).
- Badu Yu.B., Podbornyi E.E. Division of permafrost according to cryostratigraphy and complexity of geocryological conditions, with implications for drilling and operation of wells. *Ibid.*, p. 289–300.
- Budantseva N.A., Badu Yu.B., Vasil'chuk Yu.K., Podbornyi E.E. Salinity of soils. *Ibid.*, p. 145–167.
- Dakhnov N.V. *Elektricheskaya razvedka neftyanykh i gazovykh mestorojdeniy* [Resistivity Surveys in Oil and Gas Fields]. Moscow, Gostoptekhizdat, 1953, 692 p. (in Russian).
- Zykov Yu.D. *Geofizicheskie metody issledovaniya kriolitozony* [Geophysical Surveys in Permafrost]. Moscow, Moscow University Press, 2007, 272 p. (in Russian).
- Kaminsky A.E., Erokhin S.A., Politcina A.V. Full inversion of shallow geophysical data. *Inzhenernyye Izyskaniya* [Engineering Survey], 2016, No. 9, p. 44–51 (in Russian).
- Matveev V.S., Ryzhov A.A. Geophysical support for regional hydrogeological, engineering-geological, geocryological, and geoenvironment studies. *Razvedka i Okhrana Nedr* [Subsoil Exploration and Conservation], 2006, No. 2, p. 50–57 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Sinitsky A.I., Antonov E.Y., Eltsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Eпов M.I. Results of geophysical surveys of the area of “Yamal crater”, a new geological structure. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 84–95.
- Podbornyi E.E. Geomorphological characteristic. In: *Permafrost in Oil-Gas-Condensate Fields in the Yamal Peninsula*. Saint Petersburg, Nedra, 2006, vol. 1, p. 38–48 (in Russian).
- Yakupov V.S. *Geofizika kriolitozony* [Geophysics of Permafrost Areas]. Yakutsk, Yakutsk University Press, 2008, 342 p. (in Russian).
- Dafflon B., Hubbard S., Ulrich C. et al. Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region. *Geophysics*, 2016, vol. 81, p. WA247–WA263.
- Hauck C. Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, No. 21, p. 1–4.
- Hubbard S.S., Gangodagamage C., Dafflon B. et al. Quantifying and relating land-surface and subsurface variability in permafrost environments using LiDAR and surface geophysical datasets. *Hydrogeology J.*, 2013, vol. 21, p. 149–169.
- Ingeman-Nielsen T., Foged N., Butzbach R., Jørgensen A.S. Geophysical investigation of saline permafrost at Ilulissat, Greenland. In: *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost*, Fairbanks, USA, Univ. of Alaska, 2008, vol. 1, p. 773–778.
- Krautblatter M., Verleysdonk S., Flores-Orozco A., Kemna A. Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps). *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2010, vol. 115, No. F2, p. 1–15.
- Oldenborger G.A., LeBlanc A.-M. Time-lapse electrical resistivity surveys and unfrozen water content in cold continuous permafrost. In: *Proc. of the 17th Near Surface Geosci. Conf., EAGE (3–7 Sept. 2017)*, Malmo, Sweden, Tu 23 B11, p. 1–5.
- Yoshikawa K., Leuschen C., Ikeda A. et al. Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice). *J. Geophys. Res.: Planets*, 2006, vol. 111, No. E06S19, p. 1–10.
- URL: <http://www.geotech.ru> (submittal date: 01.05.2011).
- URL: <http://x2ipi.ru> (submittal date: 01.09.2013).

*Поступила в редакцию 27 декабря 2016 г.,
после доработки – 10 ноября 2019 г.,
принята к публикации 22 января 2019 г.*