

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А.А. ТРОФИМУКА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



**Недропользование. Горное дело.  
Направления и технологии поиска,  
разведки и разработки месторождений  
полезных ископаемых. Экономика.  
Геоэкология.**

Материалы XVI международной научной конференции



Новосибирск

20-24 апреля, 2020

**Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология:** Материалы XVI международной конференции (20-24 апреля 2020, Новосибирск) / Сетевое электронное издание. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. –Новосибирск. 2020. xxx с.

**ISBN 978-5-4262-0102-6**

doi: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020

#### **Программный комитет:**

##### **Координаторы:**

Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Кондратенко Андрей Сергеевич, ИГД СО РАН, г. Новосибирск

Конторович Алексей Эмильевич, академик РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Неволько Александр Иванович, начальник департамента по недропользованию по Сибирскому федеральному округу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра», г. Новосибирск

Эпов Михаил Иванович, академик РАН, ИНГГ СО РАН, СНИИГГиМС, г. Новосибирск

##### **Сопредседатели:**

Ельцов Игорь Николаевич, д.т.н. ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Каширцев Владимир Аркадьевич, чл.-корр. РАН, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Филимонова Ирина Викторовна, д.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

##### **Секретари:**

Комарова Анна Владимировна, к.э.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: KomarovaAV@ipgg.sbras.ru

Левичева Александра Викторовна, к.г.-м.н., СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: LevichevaAV@ipgg.sbras.ru

Сурикова Екатерина Сергеевна, к.г.-м.н., СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: SurikovaES@ipgg.sbras.ru

Чеботарева Анастасия Владимировна, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: ChebotarevaAV@ipgg.sbras.ru

Шумскайте Мария Йоновна, к.т.н., ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

e-mail: ShumskaiteMI@ipgg.sbras.ru

**Адрес оргкомитета:** Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект ак. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН.

**При поддержке** Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Самостоятельное неперiodическое локальное статичное научное сетевое электронное издание. Системные требования: наличие на устройстве ПО для просмотра PDF-файлов.

Статьи публикуются в авторской редакции.

**ISBN 978-5-4262-0102-6**

© ИНГГ СО РАН, 2020

## **ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОДОЗЁРНОГО ТАЛИКА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)**

### ***Александр Николаевич Шеин***

Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало–Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, кандидат физико–математических наук, ведущий научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр–т Ак. Коптюга, 3, старший научный сотрудник

Забайкальский государственный университет, 672039, Россия, г. Чита, ул.Александро–Заводская, д.30, доцент, e–mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

### ***Владимир Владимирович Оленченко***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр–т Ак. Коптюга, 3, кандидат геолого–минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, тел.: +7(383) 330–79–08, e–mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

### ***Ярослав Константинович Камнев***

Научный центр изучения Арктики, 629008, Россия, Тюменская область, Ямало–Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, кандидат физико–математических наук, заведующий сектором криосферы, тел.: +7(34992) 4–64–21, e–mail: KamnevYK@gmail.com

В работе представлены результаты численного моделирования данных электротомографии (ЭТ) и зондирований становлением (ЗС) над моделью промерзающего подозёрного талика под хасыреем вблизи стационара «Парисенто» (п–ов Гыдан). Показано, что при инверсии данных ЭТ возникают артефакты, которые интерпретируются как увеличение размеров талика с глубиной. Установлено, что с помощью метода ЗС можно определить нижнюю границу талика и подошву многолетнемёрзлой толщи на глубине 300 м с точностью до 10 м.

**Ключевые слова:** мерзлота, хасырей, подозёрный талик, численное моделирование, электротомография, зондирование становлением, полуостров Гыдан

## **POSSIBILITIES OF ELECTROMAGNETIC METHODS IN THE INVESTIGATIONS OF TALIK UNDER LAKE (NUMERICAL MODELING)**

### ***Alexandr N. Shein***

Arctic Research Center of the Yamal–Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal–Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, PhD, Research Scientist

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, Research Scientist

Transbaikal State University, 30 Aleksandro–Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia, associate professor, e–mail: SheinAN@ipgg.sbras.ru

***Vladimir V. Olenchenko***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptuyuga Prosp., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Head of the laboratory, phone: +7(383) 330–79–08, e-mail: OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

***Yaroslav K. Kamnev***

Arctic Research Center of the Yamal–Nenets Autonomous District, 20 Respubliki st., Salekhard, Yamal–Nenets Autonomous District, Tyumen region, 629008, Russia, PhD, Head of sector of cryosphere, phone: +7(34992) 4–64–21, e-mail: KamnevYK@gmail.com

The paper presents the results of numerical modeling of electroresistivity tomography (ERT) and transient electromagnetic (TEM) signals for the model of a freezing talik under khasyrei near the "Parisento" field station (Gydan peninsula). The inversion of ERT data results in artifacts that interpreted as an increase of the talik with depth. It is shown that TEM method is useable to determine the bottom of the talik and the base of the permafrost at a depth of 300 m with an accuracy of 10 m.

**Key words:** permafrost, khasyrey, talik under lake, numerical modeling, electrical resistivity tomography, transient electromagnetic, Gydan peninsula

Слабоизученные территории арктического региона являются перспективными для промышленного освоения, что определяет необходимость геокриологических исследований на этих территориях. Гыданский полуостров не является исключением, здесь в 80–е годы были организованы несколько стационаров для изучения криолитозоны. Многие из них были заброшены в 90–е годы. В 2015 г. правительством ЯНАО был поднят вопрос о возобновлении экологического мониторинга криолитозоны на стационаре «Парисенто», который находится в Тазовском районе ЯНАО в среднем течении реки Юрибей в районе одноимённого озера. В 2016–2018 гг. Научным центром изучения Арктики ЯНАО были организованы комплексные научные экспедиции на стационар «Парисенто».

Участок стационара «Парисенто» расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью 200–300 м и температурой до  $-8^{\circ}\text{C}$ . Толщина сезонно–талого слоя колеблется в широких пределах: от 55–65 см на полигональных торфяниках и до 170–180 см на песчаных раздувах, лишенных растительности. Льдистость мёрзлых пород достигает 90%. На территории стационара «Парисенто» преобладающее положение в рельефе занимает поверхность верхнечетвертичной морской

равнины с отметками 10–46 м. В пределах равнины развиты заозёрные (до 40%) территории, к пологоволнистым участкам обычно приурочены хасыреи.

Хасыреи – это заторфованные котловины спущенных термокарстовых озёр с сочетанием травяно–сфагново–кустарничковых болот, мелких озерков и формирующихся бугров пучения [1]. Структура таких образований представляет большой научный интерес и в последнее время появляется всё больше публикаций по результатам их исследований. Хасыреи изучают в связи с эмиссией метана [2], динамикой термокарстовых процессов, как индикаторный признак деградации криолитозоны [3–5]. Кроме того, по одной из версий [6] процесс промерзания подозёрного талика может приводить к образованию крупных бугров пучения, которые в свою очередь являются причиной термокарстовых воронок взрыва. Некоторые работы посвящены изучению строения подозёрных таликов геофизическими методами [7–9].

В 5 км к юго–востоку от стационара «Парисенто» расположен хасырей, где в 80–е годы прошлого столетия проводились электрические зондирования методом ВЭЗ и были оборудованы более десяти термометрических скважин глубиной 12 м. В 2018 г. подозёрный талик изучался методом электротомографии (ЭТ) [10]. Все эти работы подтвердили существование мощной таликовой зоны. Применение современных методов электроразведки [10] позволило уточнить строение подозёрного талика и установить, что глубина промерзания в пределах спущенного озера за период с 1996 г. по 2018 г. составила 17–22 м, а приблизительная скорость промерзания достигает 1 м/год.

Метод электротомографии позволяет изучать структуру, а при многолетних наблюдениях и динамику изменения подозёрных таликов. Тем не менее объёмы проведённых в 2018 году исследований не позволили в полной мере прояснить все вопросы, связанные со строением подозёрного талика. Одним из главных нераскрытых аспектов является глубина его протаивания. Чтобы прояснить некоторые вопросы по строению исследуемого объекта и скорректировать возможное продолжение работ было проведено численное моделирование

данных ЭТ и зондирований становлением поля (ЗС) для модели подозёрного талика, построенного по результатам работ 2018 г.

Для прямого двумерного моделирования и дальнейшей инверсии данных ЭТ использовался пакет программ Res2DMod и Res2DInv (Geotomo Software, Малайзия). На основе результатов ЭТ, полученных в 2018 г., была построена упрощённая двумерная геоэлектрическая модель (рис. 1а) сквозной таликовой зоны со следующими параметрами: сопротивление талых пород составляет  $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , которые перекрыты промёрзшими породами мощностью  $17 \text{ м}$  и сопротивлением  $800 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ; сопротивление ММП, над которыми присутствует глинистый слой мощностью  $2,5 \text{ м}$ , составляет  $5 \text{ кОм}\cdot\text{м}$ .

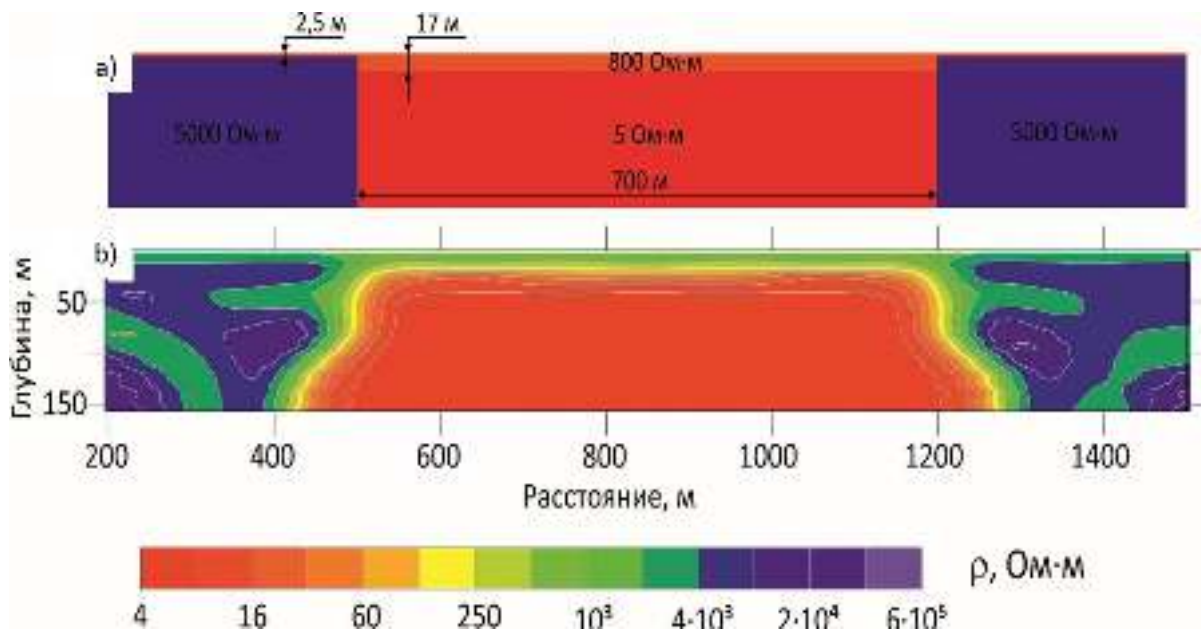


Рис. 1. Двумерная геоэлектрическая модель сквозной таликовой зоны (а) и результат инверсии модельных данных ЭТ над таликовой зоной (б)  
Fig 1. 2D geoelectrical model through talik zone (a) and result of inversion of modeling data of ERT above talik zone (b)

Кроме модели сквозного подозёрного талика были построены модели таликов разной мощности. Прямое моделирование и последующая инверсия синтетических данных показали, что для такой модели хасырея сохраняются известные свойства стандартных установок [11]: установки Веннера и трёхэлектродная чувствительны к горизонтальным границам, дипольная установка – к вертикальным, а Шлюмберже в достаточной степени определяет

оба типа границ. Однако в сочетании уровня сигнала, глубинности и чувствительности к границам различной направленности наиболее оптимальной считается трёхэлектродная установка.

Моделирование электрического поля проводилось для трёхэлектродной установки с межэлектродным расстоянием 10 м. В результате было установлено, что мощность таликовой зоны для заданных параметров модели определяется с точностью до 10 м. Кроме того был выявлен артефакт, возникающий при инверсии синтетических данных. Хорошо видно, что область низкого УЭС расширяется с глубиной (рис. 1b). Такая же картина наблюдалась при инверсии полевых данных [10] в 2018 г. В связи с этим можно сделать вывод, что обнаруженное расширение «таликовой зоны» с большой вероятностью является ложным эффектом.

Однако ограниченная глубинность исследования методом ЭТ и большая мощность мерзлоты (200–300 м) не позволяют определить мощность протаивания под бывшим озером. Как следствие, для решения данной задачи нужно увеличить глубину зондирования. Этого можно добиться путём увеличения расстояния между электродами и/или количеством электродов, либо использовать метод зондирования становлением поля (ЗС).

Для оценки возможностей метода ЗС при изучении строения подозерного талика было проведено моделирование нестационарных сигналов для одномерных моделей (программа UnvQQ, авторы Антонов Е.Ю., Эпов М.И.) [12], параметры которых выбирались в соответствии с исследованиями 2016 г. и 2018 г. Одна из тестовых моделей соответствовала одномерному разрезу без таликовой зоны (табл. 1), когда до глубины 250 м распространяются мёрзлые породы, сопротивление которых понижается с глубиной из-за засоленности. Глубже располагается кровля подстилающего слоя очень низкого УЭС (5 Ом·м), проинтерпретированная в 2016 г. как нижняя граница многолетнемёрзлой толщи.



Для моделирования нестационарного электромагнитного сигнала использовалась установка с генераторной петлёй  $200 \times 200$  м и соосной приёмной петлёй размером  $50 \times 50$  м. Ток в генерирующей петле был единичным. В первом случае (табл. 1) изучалась чувствительность метода ЗС к верхней границе подстилающего низкоомного горизонта – подошва ММП. Для этого был рассчитан сигнал становления (рис. 2, кривая а) для начальной модели (табл. 1) и с изменённой мощностью третьего слоя: 160 м вместо 150 м. После этого вычислили относительное отклонение двух полученных кривых. В результате можно заметить, что относительное отклонение превышает 7% (рис. 2, кривая 1). Принято считать, что изменение сигнала в 5% достаточно для обнаружения искомого объекта, поэтому можно говорить, что для заданных условий метод ЗС может быть применён для картирования подошвы ММП с точностью 10 м.

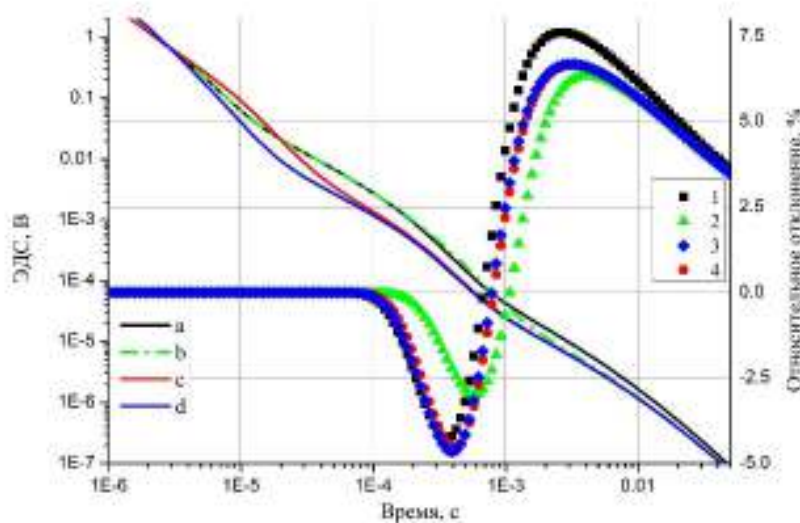


Рис. 2. Кривые становления и относительные отклонения для тестовых моделей одномерных сред без талика: а – начальная модель; б –  $h_3 = 200$  м; в –  $h_2 = 100$  м; г –  $h_1 = 100$  м; 1 –  $h_3 = 150$  м и  $h_3 = 160$  м; 2 –  $h_3 = 200$  м и  $h_3 = 210$  м; 3 –  $h_1 = 100$  м;  $h_3 = 150$  м и  $h_3 = 160$  м; 4 –  $h_2 = 100$  м;  $h_3 = 150$  м и  $h_3 = 160$  м

Fig 2. TEM signals and relative errors for test models 1D mediums without:  
а – start model; б –  $h_3 = 200$  m; в –  $h_2 = 100$  m; г –  $h_1 = 100$  m; 1 –  $h_3 = 150$  m и  $h_3 = 160$  m; 2 –  $h_3 = 200$  m и  $h_3 = 210$  m; 3 –  $h_1 = 100$  m;  $h_3 = 150$  m и  $h_3 = 160$  m; 4 –  $h_2 = 100$  m;  $h_3 = 150$  m и  $h_3 = 160$  m



Таблица 1. Тестовая модель горизонтально–слоистой среды без талика  
Table 1. Test model of horizontally layered medium without talik

№ слоя	$\rho$ , Ом·м	h, м
1	2000	50
2	500	50
3	50	150
4	5	

Таблица 2. Тестовая модель горизонтально–слоистой среды с таликом  
Table 1. Test model of horizontally layered medium with talik

№ слоя	$\rho$ , Ом·м	h, м
1	500	20
2	5	180
3	50	20
4	5	

На следующем этапе увеличивались поочерёдно мощности третьего, второго и первого слоя и рассчитывались соответствующие сигналы (рис. 2, кривые b, c, d). Таким образом, определена пороговая глубина чувствительности к нижней границе ММП. При заданных параметрах модели она оказалась равна 300 м при разных мощностях первого, второго и третьего слоя. Стоит сказать, что при погружении ММП ниже 300 м метод зондирования становлением поля также может быть применён, но разрешающая способность будет падать с глубиной.

Параметры второй тестовой модели соответствовали геоэлектрическому разрезу с таликовой зоной (табл. 2). Здесь отсутствует верхний высокоомный слой, который был в модели без талика. Вместо него сформировался более проводящий мёрзлый слой мощностью 20 м [10]. Второй слой имитирует растеплённые породы, третий – не протаявшую часть (в случае несквозного талика). Далее, как и выше, отмечается нижняя граница многолетнемёрзлой толщи.

Вторая модель позволила нам определить возможность обнаружения несквозного талика методом ЗС. Для этого сопротивление третьего слоя второй тестовой модели (табл. 2) было принято за 5 Ом·м и рассчитана кривая

становления для модели сквозного талика (рис. 3, кривая а). Затем был рассчитан нестационарный сигнал над моделью несквозного талика (табл. 2) и вычислено отклонение относительно первой кривой (рис. 3, кривая 2). Видно, что параметры такой таликовой зоны могут быть определены методом ЗС. То же самое можно сказать про мёрзлую перемычку 30 м на глубине 300 м (рис. 3, кривая 1).

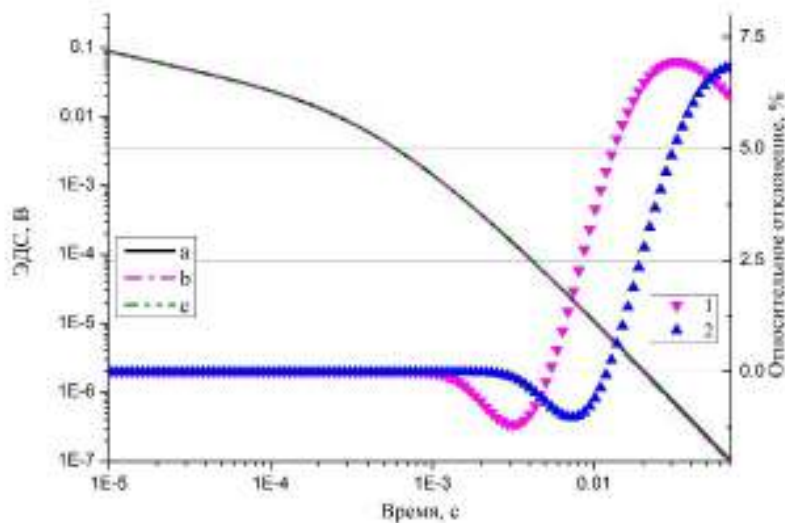


Рис. 3. Кривые становления и относительные отклонения для тестовых моделей одномерных сред с таликом: а – сквозной талик; б – перемычка 20 м на глубине 200 м; с – перемычка 30 м на глубине 300 м; 1 – перемычка 20 м на глубине 200 м; 2 – перемычка 30 м на глубине 300 м

Fig 3. TEM signals and relative errors for test models 1D mediums and with talik: а – through talik; б – dam 20 м on depth 200 m; с – dam 30 m on depth 300 m; 1 – dam 20 m on depth 200 m; 2 – dam 30 m on depth 300 m

Таким образом, в результате численного моделирования данных электротомографии установлено, что на инверсионной модели возникают артефакты – ложные расширения талика с увеличением глубины, что необходимо учитывать при полевых работах.

Численное моделирование индукционных переходных характеристик позволило определить, что для условий стационара «Парисенто» метод ЗС может быть применён для картирования подошвы ММП с точностью 10 м до глубин 300 м.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331–2019–0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирпотин С.Н. Западная Сибирь – уникальный болотный регион и ее роль в регулировании глобального климата // Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном контексте: сборник статей / под. ред. С.Н. Кирпотина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – С. 22–42.
2. Anthony K.W., von Deimling T.S., Nitze I., Froking S., Emond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature Communications. – 2018. – 9(1). – 3262.
3. Bouchard F., MacDonald L.A., Turner K.W., Biskaborn B.K., Thienpont J.R., Medeiros A.S. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution // Arctic Science. – Vol.3. – 2017 – P.91–117.
4. Прейс Ю.И., Симонова Г.В., Слагода Е.А. Детальная стратиграфия и динамика хасырея Центрального Ямала в верхнем голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – №10. – С. 35–49.
5. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование земли из космоса. – 2009. – №4. – с. 88–96.
6. Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.Y., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia) // Scientific Reports, – 2018. – V.8. – Article number: 13534.
7. Burgess M.M., Judge A., Taylor A., Allen V. Ground temperatures studies of permafrost growth at a drained lake site Mackenzie Delta // Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conference. Roger J. E. Brown Memorial Volume. – Calgary, Alberta, Canada, 1982. – P. 3–11.
8. Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.B., Shiklomanov A.N. Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafrost and Periglac Process. – 2018. – Vol.29. – P.49–59.
9. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M., Jones B.M., Bondurant M., Engram M., Lenz J., Overduin P.P., Grosse G., Babcock E., Arp C.D. Transient Electromagnetic Surveys for the Determination of Talik Depth and Geometry Beneath Thermokarst Lakes // Journal of geophysical research–solid earth. – 2018. – Vol.123. – №11. – P. 9310–9323.
10. Шеин А.Н., Оленченко В.В., Камнев Я.К., Сеницкий А.И. Структура промерзающего подоёрного талика на стационаре Парисенто (п–ов Гыдан) по данным электротомографии // Интерэкспо ГЕО–Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск: сб. материалов в 9 т. Т. 2: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. № 2. – С. 103–110.
11. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. – 2012. – №6. – С. 54–63.
12. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of TEM data affected by fast-decaying

induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // Journal of Applied Geophysics. – 2008. – №66. – P. 31–43.

## REFERENCES

1. Kirpotin S.N. Zapadnaja Sibir' – unikal'nyj bolotnyj region i ee rol' v regulirovanii global'nogo klimata // Aktual'nye problemy jekologii i prirodopol'zovanija Sibiri v global'nom kontekste: sbornik statej / pod. red. S.N. Kirpotina. – Tomsk: Izd-vo NTL. – 2006. – S. 22–42.
2. Anthony K.W., von Deimling T.S., Nitze I., Frohling S., Emond A., Daanen R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse G. 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature Communications. – 2018. – 9(1). – 3262.
3. Bouchard F., MacDonald L.A., Turner K.W., Biskaborn B.K., Thienpont J.R., Medeiros A.S. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution // Arctic Science. – Vol.3. – 2017 – P.91–117.
4. Prejs Yu.I., Simonova G.V., Slogoda E.A. Detal'naja stratigrafija i dinamika hasyreja Central'nogo Jamala v verhnem golocene // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2016. – T. 327. – №10. – С. 35–49.
5. Dneprovskaja V.P., Bryksina N.A., Polishhuk Ju.M. Izuchenie izmenenij termokarsta v zone preryvistogo rasprostraneniya vечноj merzloty Zapadnoj Sibiri na osnove kosmicheskikh snimkov // Issledovanie zemli iz kosmosa. – 2009. – №4. – s. 88–96.
6. Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.Y., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia) // Scientific Reports, – 2018. – V.8. – Article number: 13534.
7. Burgess M.M., Judge A., Taylor A., Allen V. Ground temperatures studies of permafrost growth at a drained lake site Mackenzie Delta // Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conference. Roger J. E. Brown Memorial Volume. – Calgary, Alberta, Canada, 1982. – P. 3–11.
8. Kaverin D.A., Melnichuk E.B., Shiklomanov N.I., Kakunov N.B., Pastukhov A.B., Shiklomanov A.N. Long-term changes in the ground thermal regime of an artificially drained thaw-lake basin in the Russian European north // Permafrost and Periglac Process. – 2018. – Vol.29. – P.49–59.
9. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M., Jones B.M., Bondurant M., Engram M., Lenz J., Overduin P.P., Grosse G., Babcock E., Arp C.D. Transient Electromagnetic Surveys for the Determination of Talik Depth and Geometry Beneath Thermokarst Lakes // Journal of geophysical research–solid earth. – 2018. – Vol.123. – №11. – P. 9310–9323.
10. Shein A.N., Olenchenko V.V., Kamnev Ja. K., Sinickij A.I. Struktura promerzajushhego podozjornogo talika na stacionare Parisento (p-ov Gydan) po dannym elektrotomografii // Interjekspo GEO–Sibir'. XV Mezhdunar. nauch. kongr., 24–26 aprelja 2019 g., Novosibirsk: sb. materialov v 9 t. T. 2: Mezhdunar. nauch. konf. «Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravlenija i tehnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Jekonomika. Geojekologija». – Novosibirsk: SGUGiT, 2019. № 2. – S. 103–110
11. Balkov E.V., Panin G.L., Manshtejn Ju.A., Manshtejn A.K., Beloborodov V.A. Elektrotomografija: apparatura, metodika i opyt primeneniya // Geofizika. – 2012. – №6. – С. 54–63.
12. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // Journal of Applied Geophysics. – 2008. – №66. – P. 31–43.