

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

УДК 550.379

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-92-104

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ ЧАШИ ДРЕНИРОВАННОГО ТЕРМОКАРСТОВОГО ОЗЕРА НА О. КУРУНГНАХ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНЫ

В.В. ОЛЕНЧЕНКО^{1,2*}, Л.В. ЦИБИЗОВ^{1,2}, А.А. КАРТОЗИЯ^{1,2}, Е.И. ЕСИН^{1,2}

1 — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

2 — Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

*OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY OF DRAINED THERMOKARST LAKE BASIN ON KURUNGNAKH ISLAND IN THE LENA RIVER DELTA

V.V. OLENCHENKO^{1,2*}, L.V. TSIBIZOV^{1,2}, A.A. KARTOZIYA^{1,2}, E.I. ESIN^{1,2}

1 — Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

2 — Novosibirsk national research state university, Novosibirsk, Russia

*OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Received November, 21, 2018

Accepted February, 11, 2018

Keyword: electrical-resistivity tomography, permafrost, thermokarst lake.

Summary

Evolution of permafrost under thermokarst lakes is an actual question in the light of such problems of cryolytic zone research as greenhouse gas emission, permafrost degradation and cryovolcanism. Recently drained thermokarst lake provide an opportunity to study under-lake permafrost state with ground geophysical methods. This lake located on Kurungnakh island (composed of Yedoma ice complex deposits) in the Lena delta was studied with electrical resistivity tomography. Local low-resistivity anomaly in the central part of the lake was found during previous geophysical research. Main goal of this work is detection of residual thermal effect from a frozen under-lake talik in an electric field. Satellite images of different years show that the drainage has taken place about 30 years ago. The area of the lake was covered in 2016 by high-resolution aerial imagery (5 cm/pixel), then digital elevation model was built using photogrammetry. These data were

Citation: Olenchenko V.V., Tsibizov L.V., Kartoziya A.A., Esin E.I. Electrical resistivity tomography of drained thermokarst lake basin on Kurungnakh island in the Lena river delta. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 1: 92–104. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-1-92-104.

used for geomorphological description of the alas (depression in permafrost after lake drainage). The alas depth reaches 8 m, its size is about 300×500 m. It was formed probably on the last stage of Holocene thermokarst activity and it is relatively shallow in comparison to other typical alas on the island. A number of baijarachs (as a result of polygonal ice wedges thawing) were observed on the alas bottom. A line of the steepest slope marks a coast line of the lake, which allows to estimate a volume of water, which was contained in it earlier. Electrical resistivity tomography was implemented on 8 parallel profiles of 235 m. Measurements were conducted with dipole-dipole array. Basing on 3-dimensional inversion results a 3-dimensional resistivity model of under-lake deposits up to 40 m deep was made. Relatively low resistivity area ($16\text{--}25$ kOhm·m in comparison to $50\text{--}100$ kOhm·m) was registered at the depth of $15\text{--}35$ m. It is probably linked to a temperature anomaly ($-3\text{--}-5$ °C in comparison with -8.5 °C average value of the region). Therefore the under lake talik was fully frozen but the rest of temperature anomaly is still observable. 3-dimensional finite-element modeling of talik propagation (500 years) and refreezing (30 years) was done in axisymmetric setting taking phase transition into account. Temperature anomaly up to 0 °C in its center at the depth of 35 m was obtained as a result of the modeling. It qualitatively confirms the interpretation of electrical resistivity tomography data on the residual temperature anomaly below the basin of the drained lake.

Поступила 21 ноября 2018 г.

Принята к печати 11 февраля 2018 г.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, термокарстовое озеро, электротомография.

В статье представлены результаты изучения геоэлектрического строения разреза в пределах чаши термокарстового озера, дренировавшего около 30 лет назад. Предшествующими электроразведочными исследованиями в центре котловины зарегистрирована зона пониженных сопротивлений, предположительно связанная с остаточной температурной аномалией. Главной целью настоящей работы являлось установление проявления остаточного теплового эффекта от промерзшего подозерного талика в электрическом поле. Зондирования проведены методом электротомографии с использованием дипольно-осевой установки. В объемной геоэлектрической модели, построенной по результатам 3D-инверсии, околонулена аномалия пониженного удельного электрического сопротивления на глубине 25 м. На основе приближенной зависимости удельного электросопротивления пород от температуры предположено, что температура пород, прогнозируемая по данным электроразведки, под аласом в центральной части промерзшего талика на $5\text{--}6$ °C выше, чем температура пород в данном районе. Численным моделированием теплового поля подтверждено существование остаточной тепловой аномалии после промерзания подозерного талика.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние многолетнемерзлых отложений под термокарстовыми озерами является предметом многих исследований. Это связано с такими актуальными проблемами изучения криолитозоны, как криовулканизм [1–3] и эмиссия органического углерода вследствие деградации многолетнемерзлых пород (ММП) [4–6]. Геофизические методы позволяют получить информацию о мощности донных отложений и форме талика, оценить границы зоны теплового влияния озера на вмещающие породы [7–8]. Дренировавшие в недавнем времени озера предоставляют возможность изучить строение подозерного разреза наземными геофизическими методами, избегая множества технических сложностей, связанных с применением аппаратуры и отбором донных проб в водной среде. Известен случай искусственного спуска воды термокарстового озера в научных целях [9]. Данные о строении подозерных толщ позволяют скорректировать численные модели термокарста в криолитозоне [10–14].

Настоящая работа посвящена исследованию подозерных отложений относительно недавно дренировавшего термокарстового озера на о. Курунгнах в дельте р. Лены. В ходе последних исследований многолетнемерзлых отложений на о. Курунгнах [15] в центре озера зарегистрирована зона пониженных сопротивлений, предположительно связанная с остаточной температурной аномалией. Главной целью настоящей работы являлось установление проявления остаточного теплового эффекта от промерзшего подозерного талика в электрическом поле.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучаемая термокарстовая котловина (далее алас) располагается в юго-восточной части острова Курунгнах (рис. 1а). Это вытянутая отрицательная форма рельефа с размерами 330×530 м и глубиной около 8 м (рис. 1б). Дно аласа осложняют многочисленные современные байджарахи высотой не более 1,5 м. Алас развился на плоской поверхности третьей надпойменной террасы [16, 17]. Высота террасы над урезом реки в данном месте достигает порядка 50 м. В целом третья надпойменная терраса острова Курунгнах имеет трехчленное строение: нижняя часть — верхне-неоплейстоценовые пески; средняя часть — отложения ледового комплекса дельты р. Лены каргинского возраста; самую верхнюю часть разреза составляют голоценовые алевриты и глины с линзами торфа [18]. Алас развился непосредственно в голоценовых отложениях и образованиях ледового комплекса. Геологическое строение острова было неоднократно изучено предшественниками путем исследования береговых обнажений, располагающихся в 1–2 км от изучаемого аласа. Согласно данным [17], пик термокарстовой активности на данной территории произошел в начале голоцена. Исходя из небольшой глубины котловины, а также малых размеров аласа в сравнении с соседними большего размера и доказанным ранне-среднеголоценовым возрастом, можно предположить, что данный алас сформировался на финальной стадии голоценовой термокарстовой активности уже после формирования перекрывающих ледовый комплекс голоценовых образований.

В настоящий момент озеро, существовавшее на месте аласа, полностью дренировалось. Однако оно присутствует на старых топографических картах, основанных на материалах 1971–1973 гг., и на старом мультиспектральном космическом снимке Landsat 1 (отключен в 1978 г.). На более поздних космических снимках Landsat ETM+ 2000 и 2002 гг., находящихся в открытом доступе, озеро уже отсутствует. Озеро дренировалось через овраг в юго-восточной части аласа. Уже после спуска воды аласа поверхность дна аласа покрылась многочисленными байджарахами. Кроме того, вдоль береговой линии спущенного озера наблюдаются многочисленные натечные солифлюкционные микроформы рельефа.

В 2016 г. часть о. Курунгнах, включающая исследуемый алас, была покрыта аэрофотосъемкой высокого разрешения (0,05 м на пиксель) с применением беспилотного летательного аппарата [15]. По материалам аэрофотосъемки методом фотограмметрии была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным горизонтальным разрешением 0,5 м и вертикальным 0,2 м (рис. 1б). Эти данные были проанализированы с применением программного пакета ESRI ArcGIS 10.2.2. В результате анализа нами был выявлен контур береговой линии спущенного озера. Эта линия маркируется резким невысоким вертикальным уступом (рис. 1в) между недеградировавшей плоской поверхностью ледового комплекса или слегка наклонной

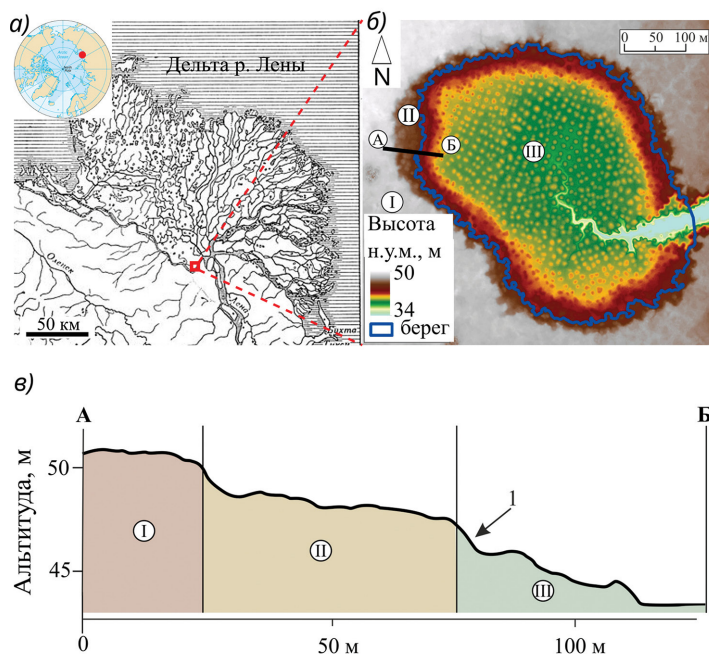


Рис. 1. Схема расположения участка исследований (а), цифровая модель рельефа (б) и профиль высоты вкост склона аласа по линии АБ (в).

I — недеградировавшая поверхность третьей надпойменной террасы, II — поверхность, измененная солифлюкционными микроформами, III — дно дренировавшего озера; отметка I — субвертикальный уступ, маркирующий берег спущенного озера

Fig. 1. Digital elevation model (a) and height profile across the alas slope (b). The boundary of the coastline of the lowered lake is marked with a blue line (a), and a topographic profile (c).

I — not degraded surface of the third above-flood terrace, II — surface modified by solifluction microforms, III — bottom of the drained lake; mark I — subvertical bench marking the shore of a lowered lake

поверхностью ледового комплекса, измененной солифлюкционными процессами, и дном аласа с байджарами.

У подножья данного уступа наблюдаются вытянутые водоемы и озерки. На протяжении всего выявленного контура отмечается выдержанность абсолютной высоты (46,5 м над уровнем моря (н.у.м)). После того, как были восстановлены границы озера, был оценен его примерный объем — около 554 779 м³. Конечно, данная оценка является примерной и не учитывает многочисленные изменения, произошедшие с поверхностью дренированного аласа после его дренажа, такие как солифлюкционные натеки, термоэрозийное дальнейшее развитие оврага и т.д. Однако данная оценка дает примерное представление о величине спущенного озера.

Таким образом, термокарстовое озеро было спущено в результате овражной эрозии береговой линии приблизительно 30 лет назад. За это время происходило промерзание подозерного талика.

При проведении геофизических исследований использовалась многоэлектродная электроразведочная аппаратура «Скала-48» [19]. Зондирования выпол-

нены на 8 профилях длиной по 235 м. Расстояние между профилями составляло 25 м, шаг измерений по профилю — 5 м. Уровень сопротивлений заземлений изменялся в пределах 0,5–6 кОм, в зависимости от приповерхностных условий. Самые низкие сопротивления заземлений были при заземлении в сезонноталую почву под мох. На участках, где под толстой моховой подушкой присутствовал лед, сопротивление заземления возрастало до нескольких кОм. Последовательность подключения электродов соответствовала дипольно-осевой установке. Уровень измеряемого сигнала на приемных электродах составлял от первых десятков до первых тысяч мВ. При этом сила тока в питающей линии изменялась от первых десятков до первых сотен мА. Такой высокий уровень входного сигнала и отсутствие промышленных помех обеспечивали хорошее качество данных, приборная погрешность определения сопротивления в среднем составляла 0,025 %, а единичные выбросы с погрешностью более 1 % отбраковывались при первичной обработке данных в программе RiPPP. Инверсия выполнялась при помощи программ RES2DINV и RES3DINV [20]. При двухмерной инверсии после 5 итераций ошибка подбора составляла 3,3–10,1 %, а после 6 итераций трехмерной инверсии — 13,6%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

На рис. 2 приведена схема расположения геофизических профилей в алесе (2а) и объемная геоэлектрическая модель участка (2б), построенная по результатам 3D-инверсии и визуализированная с помощью программы Voxler. Объемная модель представляет собой распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) пород. Верхняя часть модели срезана до глубины 6 м, для того чтобы исключить отображение приповерхностной области низкого УЭС, связанной с влиянием деятельного слоя.

Общий уровень УЭС пород очень высокий и изменяется от 150000 Ом·м до 100000 Ом·м. Такие большие значения электросопротивления связаны с низкой температурой многолетнемерзлой толщи, низкой минерализацией поровой влаги, а также высокой льдистостью отдельных слоев, которые выделяются в модели аномалиями максимального УЭС (цифра 1 на рис. 2б).

Область пониженных значений УЭС пород выделяется с глубины около 20 м (цифра 2 на рис. 2б). Эта аномалия, вероятно, связана с промерзшим подозерным таликом, существовавшим под большим водоемом. Предполагается, что температура мерзлых пород в контурах бывшего талика несколько выше, чем в окружающем пространстве, и это отражается в поле УЭС.

На рис. 3 показан геоэлектрический разрез по результатам 2D-инверсии по профилю 3. На разрезе в приповерхностной части выделяется слой пород относительно низкого (1000–2500 Ом·м) УЭС. Такие низкие значения УЭС связаны с повышенной температурой пород в деятельном слое и пелитовым составом перекрывающих отложений. При этом локальными вертикальными аномалиями низкого УЭС отмечаются увлажненные участки вытаявания полигонально-жильных льдов. На глубине ниже активного слоя под локальными аномалиями низкого УЭС видны узкие вертикальные аномалии высокого УЭС, связанные с ледяными жилами. Детальность электротомографии с шагом 5 м по профилю не позволяет точно определить глубину залегания жил, однако их положение на профиле видно отчетливо.

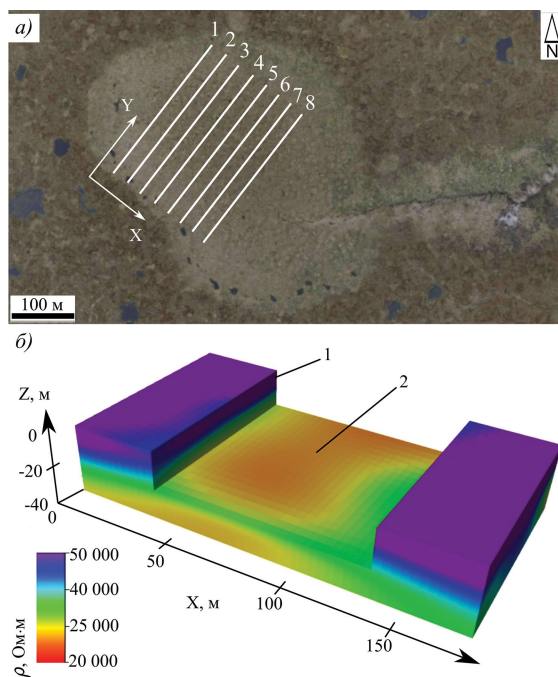


Рис. 2. Схема расположения профилей электротомографии в аласе (а) и объемная геоэлектрическая модель участка (б): 1 — слой anomalously высокого УЭС; 2 — аномалия пониженного УЭС, связанная с промерзшим подозерным таликом

Fig. 2. The layout of the profiles of electrical resistivity tomography in alas (a) and the 3-dimensional geoelectrical model of the site (b): 1 — a layer of anomalous high resistivity; 2 — anomaly of low resistivity associated with a frozen under-lake talik

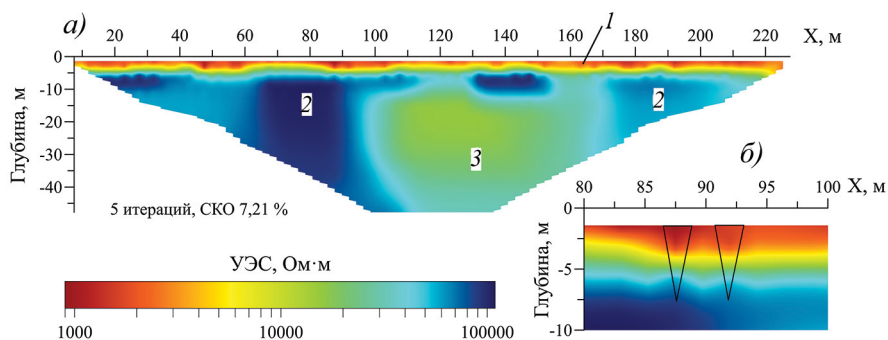


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю 3 по результатам 2D-инверсии (а) и увеличенный фрагмент (б).

1 — слой низкого УЭС, связанный с повышенной температурой в деятельном слое; 2 — низкотемпературные многолетнемерзлые породы; 3 — аномалия пониженного УЭС в области промерзшего подозерного талика

Fig. 3. Geoelectrical section along profile 3 according to the results of the 2D-inversion (a) and enlarged fragment (b).

1 — a layer of low resistivity associated with an elevated temperature in the active layer; 2 — low-temperature permafrost; 3 — anomaly of lowered resistivity in the area of frozen under-lake talik

С глубины около 5 м залегают породы с очень высоким (50000–100000 Ом·м) УЭС, среди которых в интервале профиля 100–170 м с глубины 10 м выделяется область пониженного до 16000–25000 Ом·м электросопротивления. Эта область интерпретируется как температурная аномалия от промерзшего подозерного талика. Отложения дельты Лены представлены верхне-неоплейстоценовыми песками [18]. Согласно приближенной зависимости УЭС пород от температуры [21] для мерзлых пресных песков сопротивлению порядка 100000 Ом·м соответствует температура -6°C , а УЭС 16000 Ом·м температура около -3°C . Известно [22], что на острове Самойловский, расположенном в том же районе исследований, температура пород на глубине от 10,7 до 27 м составляет $-8,6 \dots -8,9^{\circ}\text{C}$. Таким образом, прогнозируемые по электроразведочным данным температуры пород выше, чем характерная для этого региона температура мерзлой толщи, на 5–6 градусов. Это связано с тем, что под аласом существовал подозерный талик, который промерз в настоящее время, однако температура мерзлых пород имеет повышенные значения. Поскольку температура мерзлых песков влияет на их УЭС, то особенности строения температурного поля отражаются в геоэлектрической модели. Предполагается, что отложения имеют приблизительно однородный литологический состав (песок), следовательно, такую аномалию УЭС можно интерпретировать как следствие аномалии температуры.

Таким образом, в результате электрических зондирований установлено проявление остаточного теплового эффекта от подозерного талика в поле электрического сопротивления в виде аномалии пониженного УЭС. Общий высокий уровень УЭС пород в объемной геоэлектрической модели говорит о том, что подозерный талик промерз полностью. Однако температура пород, прогнозируемая по данным электроразведки под аласом, в центральной части промерзшего талика на 5–6 $^{\circ}\text{C}$ выше, чем температура пород в данном районе.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для подтверждения гипотезы о температурной аномалии, выделяющейся в электрическом поле, было проведено численное моделирование теплового поля. Оценка остаточной температурной аномалии под озером после дренирования и промерзания отложений была выполнена в программном пакете Comsol Multiphysics v.4.4. Методом конечных элементов решалась задача теплопроводности в осесимметричной постановке с учетом фазового перехода. Поскольку распределение температур и форма талика под озером на момент дренирования неизвестны, задача решалась в два этапа. На первом этапе было выполнено моделирование процесса развития талика под озером, на втором — процесса промерзания. Таким образом, результат расчета на первом этапе определил начальные условия для второго. Модель среды представляет собой диск радиусом 1000 м и толщиной 500 м, в центре которого расположена впадина глубиной 7 м в самой глубокой ее части — центре. На боко-

Таблица 1

Тепловые свойства пород в модели

Свойства	Мерзлая порода	Талая порода
Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,82	1,46
Объемная теплоемкость, Дж/м ³ ·К	1920	2630
Теплота фазового превращения, Дж/м ³	113970	113970
Плотность, кг/м ³	1700	1700

вых и нижней границах задана температура $-8,5^{\circ}\text{C}$ [23]. Тепловые свойства среды заданы согласно определенным экспериментально для типичных пород в данном районе [7, 16] и приведены в таблице 1.

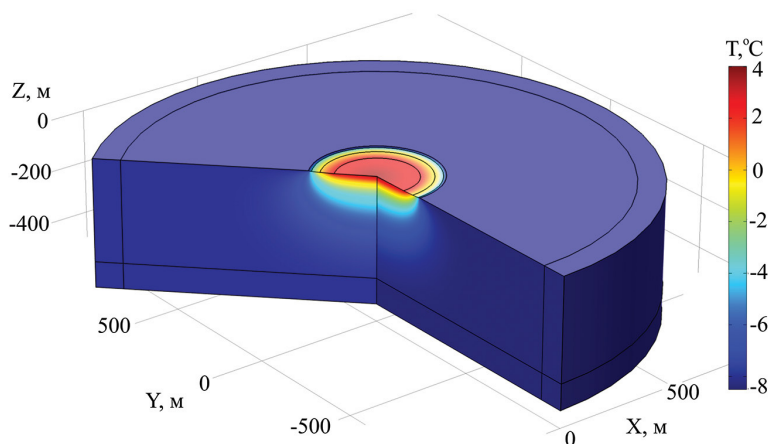


Рис. 4. Общий вид модели и расчетное распределение температуры через 500 лет после начала прогрева дна озера

Fig. 4. General view of the model and temperature distribution obtained as a result of the first stage of calculation — 500 years after the beginning of the warming up of the lake bottom

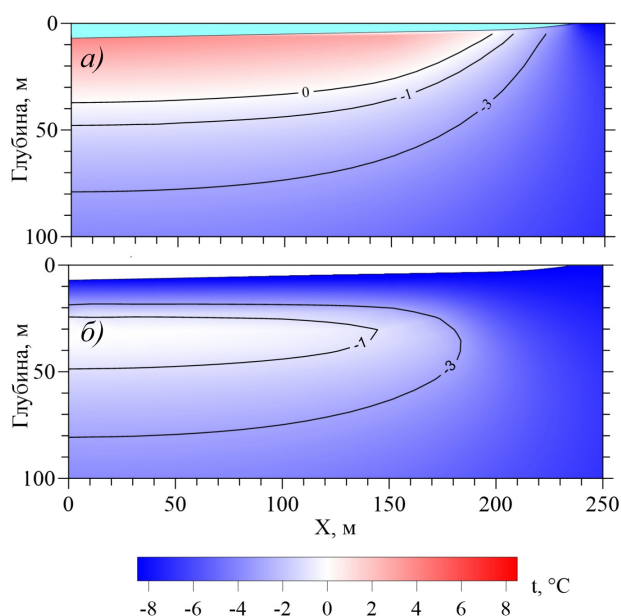


Рис. 5. Синтетическое распределение температуры в подозерных отложениях непосредственно перед дренированием (а) и через 30 лет после дренирования озера (б)

Fig. 5. Synthetic temperature distribution in under-lake sediments immediately before draining (a) and 30 years after draining of the lake (b)

Для первого этапа расчета температура на поверхности задана равной в начальный момент времени $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, на поверхности впадины — градиент от $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на верхнем краю впадины до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней ее части (температура наиболее плотной воды). Таким образом в модели задано тепловое влияние озера. Температура всей среды в начальный момент времени равна также $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Модельное время первого этапа — 500 лет. На рис. 4 приведен общий вид модели и распределение температуры, полученное в результате первого этапа расчета.

На втором этапе температура на поверхности впадины задана равной $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальное распределение температуры совпадает с полученным на первом этапе. Так в модели задан эффект дренирования озера (считается, что это произошло за относительно короткое время, в течение одного сезона). Модельное время второго этапа — 30 лет. Это соответствует оценкам на основе анализа спутниковых снимков — дренирование озера произошло в период между 1973 и 2000 гг., т.е. примерно 30 лет назад. На рис. 5 приведены распределения температур, полученных в результате первого и второго этапов.

Как видно из результата расчета (рис. 5б), распределение температуры в подозерных отложениях имеет максимум на глубине 35 м, при этом температура не превышает 0, т.е. подозерный талик полностью проморожен. Глубина залегания верхней границы (границы максимального градиента температуры) тепловой аномалии под дном спущенного озера составляет около 10 м. Температура пород в контурах тепловой аномалии существенно выше ($5\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем в окружающем пространстве, и составляет $-0,2\text{...}-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в эпицентральной части и $-1\text{...}-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в краевых частях талика. По данным электроразведки температура пород на глубине 10–25 м под аласом $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в краевых частях $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. То есть оценка температуры пород по данным электроразведки и численному моделированию тепловых полей согласуются не в полной мере.

Необходимо отметить, что результаты данного моделирования позволяют проинформировать лишь весьма приблизительную оценку распределения температур — модель не учитывает множества факторов, таких как конвективный теплоперенос, динамика уровня дна в процессе оттайки, возможные изменения состояния озера в процессе его «жизни», неоднородность строения отложений (ледовые жилы, различия в составе слоев) и т.п. Кроме того, информация о внешних условиях и тепловых свойствах среды известна лишь на основании литературных данных, а непосредственных соответствующих полевых или лабораторных исследований не проводилось. Тем не менее численное моделирование показывает контур тепловой аномалии под аласом и подтверждает ее существование. Однако истинное значение температур пород можно установить только по данным термометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате геофизических исследований в пределах чаши дренированного термокарстового озера была околтурена область пониженного удельного электрического сопротивления, предположительно связанная с остаточным тепловым эффектом от промерзшего подозерного талика.

Общий высокий уровень УЭС пород позволяет сделать предположение, что за последние 30 лет талик промерз полностью, но температура пород в центре талика на глубине 10–20 м на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем средняя температура пород в данном районе.

Численное моделирование теплового поля подтверждает существование, форму и глубину залегания температурной аномалии под аласом после спуска озера через 30 лет. Оценки распределения температуры, рассчитанного методом численного моделирования и полученного в результате применения электротомографии, качественно сходятся, но различаются количественно.

Благодарности. Исследования поддержаны: проектами ФНИ №0331-2019-0007; № 0331-2019-0016 и Проектом II.61 Комплексной программы СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования». Авторы благодарят информационно-вычислительный центр Новосибирского государственного университета за предоставленные вычислительные ресурсы.

Acknowledgements. Research is funded by: projects FSR № 0331-2019-0007; № 0331-2019-0016 and Project II.61 of the Complex SB RAS program “Interdisciplinary integrative researches”. We are grateful to the Supercomputing Center of the Novosibirsk State University for provided computational resources.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнарченко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Энов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 4. С. 94–105.
2. Епифанов В.А. Взрывные воронки-колодцы и актуальность изучения роли дегазации недр в климатических событиях и ландшафтных преобразованиях четвертичного периода // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. 36 с.
3. Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., 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. № 1. P. 13534–13540.
4. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranviket L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global biogeochemical cycles. 2004. V. 18. № 4. P. 1–12.
5. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin III F. S., Schuur E.A.G., Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2008. V. 113. № G3. P. 1–16.
6. Schuur E.A.G., McGuire A. D., C. Schädel, Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. V. 520. P. 171–179.
7. Schwamborn G.J., Dix J.K., Bull J.M., Racholdet V. High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2002. V. 13. № 4. P. 259–269.
8. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M., Jones B.M., Bondurant A., Engram M., Lenz J., Overduin P.P., Grosse G., Babcock E., Arpet 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.
9. Mackay J.R. A full-scale field experiment (1978–1995) on the growth of permafrost by means of lake drainage, western Arctic coast: a discussion of the method and some results // Canadian Journal of Earth Sciences. 1997. V. 34. № 1. P. 17–33.

10. Ling F., Zhang T. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thermokarst lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // *Journal of Geophysical Research* 2003. V. 108 (D16). P. 26–36.
11. Ling F., Zhang T. Modeling study of talik freeze-up and permafrost response under drained thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2004. V. 109. № D1. P. 1–9.
12. Zhou W., Huang S.L. Modeling Impacts of Thaw Lakes to Ground Thermal Regime in Northern Alaska // *Journal of Cold Regions Engineering*. 2004. V. 18. P. 70–87.
13. West J.J., Plug L.J. Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2008. V. 113. № F1. P. 1–14.
14. Plug L.J., West J.J. Thaw lake expansion in a two-dimensional coupled model of heat transfer, thaw subsidence, and mass movement // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2009. V. 114. № F1. P. 1–18.
15. Tsibizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V. Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung. Reports on polar and marine research*. 2017. V. 709. P. 56–69.
16. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta // *Quaternary International*. 2002. V. 89. P. 119–134.
17. Morgenstern A., Grosse G., Günther F., Fedorova I.V., Schirrmeister L. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delt // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 849–867.
18. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27. P. 1523–1540.
19. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манитейн Ю.А., Манитейн А.К., Белобородов В.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54–63.
20. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method // *Geophy. Prospec.* 1996. V. 44. P. 131–152.
21. Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.Я. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1987. 86 с.
22. Boike J., Georgi C., Kirilin G., Muster S., Abramova K., Fedorova I., Chetverova A., Grigoriev M., Bornemann N., Langer M. Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia-observations and modeling (Lena River Delta, Siberia) // *Biogeosciences*. 2015. V. 12 (20). P. 5941–5965.
23. Boike J., Kattenstroth B., Abramova E., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischnewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // *Biogeosciences*. 2013. V. 10 (3). P. 2105–2128.

REFERENCES

1. Olenchenko V.V., Sinitskii A.I., Antonov E.Iu., El'tsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I. The results of geophysical studies of the territory of the geological new formation "Iamal'skii krater". *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2015, 19, 4: 94–105. [In Russian].

2. Epifanov V.A. Explosive crater-wells and the relevance of studying the role of degassing the subsurface in climatic events and landscape transformations of the Quaternary period. *Biulleten' Komissii po izucheniiu chetvertichnogo perioda*. Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period. 2018, 76: 1–36. [In Russian].
3. Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvin 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, 8, 1: 13534–13540.
4. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranviket L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global biogeochemical cycles*. 2004, 18, 4: 1–12.
5. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin III F. S., Schuur E.A.G., Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from arctic lakes: Isotopic implications for source pathways and ages. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008, 113 (G3): 1–16.
6. Schuur E.A.G., McGuire A. D., C. Schädel, Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. 2015, 520: 171–179.
7. Schwamborn G.J., Dix J.K., Bull J.M., Racholdet V. High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002, 13, 4: 259–269.
8. Creighton A.L., Parsekian A.D., Angelopoulos M., Jones B.M., Bondurant A., Engram M., Lenz J., Overduin P.P., Grosse G., Babcock E., Arpet C.D. Transient electromagnetic surveys for the determination of talik depth and geometry beneath thermokarst lakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018, 123: 9310–9323.
9. Mackay J.R. A full-scale field experiment (1978–1995) on the growth of permafrost by means of lake drainage, western Arctic coast: a discussion of the method and some results. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1997, 34, 1: 17–33.
10. Ling F., Zhang T. Numerical simulation of permafrost thermal regime and talik development under shallow thermokarst lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *Journal of Geophysical Research*. 2003, 108 (D16): 26–36.
11. Ling F., Zhang T. Modeling study of talik freeze-up and permafrost response under drained thaw lakes on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2004, 109 (D1): 1–9.
12. Zhou W., Huang S.L. Modeling Impacts of Thaw Lakes to Ground Thermal Regime in Northern Alaska. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2004, 18: 70–87.
13. West J.J., Plug L.J. Time-dependent morphology of thaw lakes and taliks in deep and shallow ground ice. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2008, 113 (F1): 1–14.
14. Plug L.J., West J.J. Thaw lake expansion in a two-dimensional coupled model of heat transfer, thaw subsidence, and mass movement. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2009, 114 (F1): 1–18.
15. Tsubizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V. Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung. Reports on polar and marine research*. 2017, 709: 56–69.
16. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M.N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta. *Quaternary International*. 2002, 89: 119–134.
17. Morgenstern A., Grosse G., Günther F., Fedorova I.V., Schirrmeister L. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delt. *The Cryosphere*. 2011, 5: 849–867.

18. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia. *Quaternary Science Reviews*. 2008, 27: 1523–1540.
19. Balkov E.V., Panin G.L., Manshtein Iu.A., Manshtein A.K., Beloborodov V.A. Electrical-resistivity tomography: devices, methods and experience of use. *Geofizika*. Geophysics. 2012, 6: 54–63. [In Russian].
20. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophy. Prospect*. 1996, 44: 131–152.
21. Bogoliubov A.N., Bogoliubova N.P., Mozganova E.Ia. *Rekomendatsii po kompleksirovaniu geofizicheskikh metodov pri merzlotnoi s''emke*. Recommendations on the integration of geophysical methods in cryogenic surveys. PNIIS. Moscow: Stroiizdat, 1987: 86 p. [In Russian].
22. Boike J., Georgi C., Kirilin G., Muster S., Abramova K., Fedorova I., Chetverova A., Grigoriev M., Bornemann N., Langer M. Thermal processes of thermokarst lakes in the continuous permafrost zone of northern Siberia-observations and modeling (Lena River Delta, Siberia). *Biogeosciences*. 2015, 12 (20): 5941–5965.
23. Boike J., Kattenstroth B., Abramova E., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischnewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011). *Biogeosciences*. 2013, 10 (3): 2105–2128.