

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.837

DOI: 10.15372/KZ20230504

EDN: ZLTHCE

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СУБАКВАЛЬНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ
ЛАГУНЫ УОМУЛЛАХ-КЮЕЛЬ (МОРЕ ЛАПТЕВЫХ)В.В. Оленченко^{1,*}, А.Н. Фаге¹, П. Овердуин², М. Ангелопулос²¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, лаборатория геоэлектрики, 630090, Новосибирск, пр. акад. Коптюга, 3, Россия*² *Центр полярных и морских исследований им. Гельмгольца, Институт Альфреда Вегенера, 14473 Потсдам, Германия**Автор для контакта, olenchenkovv@ipgg.sbras.ru

Геофизические исследования выполнены с целью определения строения мерзлой толщи в пределах лагуны Уомуллах-Кюэль как эталонного объекта, образовавшегося в результате термокарста и термоабразии. Основной задачей было определение мощности талика под лагуной или положения кровли субаквальной многолетнемерзлой толщи. Электромагнитные и электрические зондирования методами становления поля и электротомографии выполнены в зимний период со льда и в летний период с поверхности водоема. В результате сопоставления геоэлектрических разрезов по данным электромагнитных зондирований с криолитологическим разрезом по скважине и замерами температуры пород установлены геофизические признаки современного и реликтового таликов в виде слоев очень низкого удельного электрического сопротивления. Показано, что современный талик сформировался до глубины около 30 м, а реликтовый талик под палеозером прослежен до глубины 80–100 м, что согласуется с расчетами других исследователей. Предполагается, что реликтовый талик имеет гидравлическую связь с породами под современным морем, поэтому он контрастно выделяется на геоэлектрических разрезах. Озеро, под которым формировался реликтовый талик, было размером не менее 1450 × 900 м. По данным метода электротомографии с поверхности воды установлены фрагменты границы между охлажденными и мерзлыми породами, но, как показало численное моделирование, электрическое сопротивление мерзлых пород занижено в 5–10 раз. В области перехода от субаэральной к субаквальной криолитозоне прослежено постепенное погружение кровли многолетнемерзлых пород, выделен мерзлотный козырек, который образуется на участках промерзания мелководных бассейнов. Предполагается, что постепенное понижение электро-сопротивления мерзлых пород в направлении от берега в акваторию лагуны отражает увеличение степени засоления пород и повышение их температуры.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, субаквальная криолитозона, талик, электромагнитные зондирования, электротомография.

Ссылка для цитирования: Оленченко В.В., Фаге А.Н., Овердуин П., Ангелопулос М. Геоэлектрическое строение субаквальной криолитозоны лагуны Уомуллах-Кюэль (море Лаптевых) // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 5, с. 39–53. DOI: 10.15372/KZ20230504. EDN: ZLTHCE.

GEOELECTRIC STRUCTURE OF THE SUBAQUATIC CRYOLITHOZONE
IN UOMULLAKH-KYUEL LAGOON (LAPTEV SEA)V.V. Olenchenko^{1,*}, A.N. Faguet¹, P. Overduin², M. Angelopoulos²¹ *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koptug ave. 3, Novosibirsk, 630090 Russia*² *Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Gebäude A45 14473, Potsdam, Germany**Corresponding author, olenchenkovv@ipgg.sbras.ru

We performed geophysical studies to determine the structure of the frozen layer around and below the Uomullyakh-Kyuel Lagoon, the lagoon itself being a reference landform sculpted by thermokarst and thermal abrasion of the sea shoreline. The main purpose of the study was to determine talik depth under lagoon or the position of the subaquatic permafrost boundary. We performed electromagnetic and electrical studies with transient electromagnetic sounding and electrical resistivity tomography from lagoon ice during winter period and from water surface in summer. We matched borehole section data with temperature data from this same borehole and also with surface geophysical data. This comparison showed patterns of modern and relict taliks

in the form of low electrical resistivity layers. We demonstrate that modern talik has developed to the depth of 30 m. At the same time, the relict talik is located between depths of 80–100 m, which correlates with data acquired by other researchers. We suggest that relict talik has a hydrological connection to the strata located under the seafloor; therefore it is seen clearly on geoelectric cross section. The lake that formed the relict talik had a size of at least 1450 by 900 m. Electrical resistivity tomography data acquired from the lagoon surface shows fragments of boundaries between frozen and unfrozen permafrost. Numerical modeling shows that electrical resistivity tomography quantitatively underestimates resistivity of the frozen permafrost by 5 to 10 times. In the subaerial-subaquatic transition zone, we track a gradual descent of the permafrost upper boundary and map a permafrost overhang, which sometimes appears beneath shallow water bodies. We suggest that gradual decrease of electrical resistivity in the direction from the seashore to the sea basin corresponds to the amount of salt transported into sediments and increase in their temperature.

Keywords: *permafrost, subaquatic permafrost, talik, electromagnetic sounding, electrical resistivity tomography.*

ВВЕДЕНИЕ

Изучение строения субаквальной криолитозоны актуально для прогноза эмиссии парниковых газов, при реконструкции палеоклимата и инженерно-геологических исследованиях при строительстве объектов инфраструктуры газодобычи или портовых сооружений.

На побережье северных морей в процессе трансгрессии и термоабразии в условиях широкого развития озерного термокарста возникают термокарстовые лагуны [Романовский и др., 1999; Гаврилов и др., 2006]. При этом пресные термокарстовые озера или дренированные котловины заполняются морской соленой водой, что приводит к деградации субмаринной многолетнемерзлой толщи. Одним из подобных объектов является лагуна Умуллах-Кюель, расположенная на п-ове Быковский в море Лаптевых, которая в недавнем геологическом прошлом еще была термокарстовым озером.

С деградацией подводной мерзлоты связано увеличение эмиссии парниковых газов [Шахова и др., 2009; Анисимов и др., 2012; Малахова, Голубева, 2016; Shakhova et al., 2010; Thornton et al., 2020], что влияет на климат. Озерный термокарст имеет важное значение при преобразовании верхних горизонтов мерзлых толщ в прибрежной части и на всем внутреннем шельфе. Морская трансгрессия, начавшаяся 17–16 тыс. лет назад [Романовский, Тумской, 2011], на начальной стадии выражалась в образовании многочисленных термокарстовых лагун [Романовский и др., 1999; Romanovskiy et al., 2000], при этом береговая линия смещалась к югу по системе термокарстовых депрессий, расчлняя озерно-аллювиальную равнину на многочисленные острова и полуострова. Едомные острова-останцы впоследствии постепенно уничтожались термоабразией, так же как это происходит и в настоящее время [Гаврилов и др., 2003]. Считается, что к моменту затопления термокарстовых озер под ними были сформированы талики, которые затем перешли в субмаринное состояние [Романовский и др., 1999; Тумской, 2002; Касымская, 2012].

Таким образом, изучение геоэлектрического строения субаквальной криолитозоны лагуны Умуллах-Кюель необходимо для понимания масштабов трансформации и современного состояния многолетнемерзлой толщи при заполнении термокарстовой котловины солеными морскими водами.

Для изучения строения субмаринной криолитозоны применяется как сейсмоакустика [Колюбакин и др., 2016; Shakhova et al., 2010, 2017], так и электроразведка индуктивными и гальваническими методами [Казанин и др., 2016; Кошурников и др., 2016; Walker et al., 1985; Sellmann et al., 1989; Overduin et al., 2012].

Еще в 80-х гг. прошлого века на Аляске с помощью электромагнитных зондирований с контролируемым источником определяли удельное электрическое сопротивление и мощность многолетнемерзлых пород (ММП) под водой [Walker et al., 1985; Edwards et al., 1988]. В настоящее время для решения задач литологического и геокриологического картирования в Байдарацкой губе Карского моря применяются частотные электромагнитные зондирования со льда [Зыков и др., 2008]. Электрические зондирования методом электротомографии были опробованы для оценки скорости деградации подводной мерзлоты в заливе Эльсон моря Бофорта (Аляска) и на мелководье вблизи о. Муостах в юго-восточной части моря Лаптевых [Overduin et al., 2012, 2016]. Комплексирование 2D-сейсморазведки и электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) снижает неоднозначность интерпретации при выделении субаквальной мерзлой толщи, верхние горизонты которой видны как зоны аномально высоких сопротивлений, а по данным сейсморазведки – как среда с яркими отражающими границами [Казанин и др., 2016].

Первые электромагнитные зондирования методом ЗСБ в море Лаптевых для определения положения кровли подводной мерзлой толщи и ее мощности были выполнены А.В. Кошурниковым [Кошурников и др., 2016]. Авторы с точностью

0.7 м установили положение кровли мерзлоты на глубине 24.3 м и сделали осторожное предположение, что мощность мерзлых пород достигает 600 м.

Целью наших исследований являлось определение строения мерзлой толщи в пределах лагуны Уомуллах-Кюэль как эталонного объекта, образовавшегося в результате термокарста и термоабразии. Основной задачей было определение мощности талика под лагуной или положения кровли субаквальной многолетнемерзлой толщи.

Исследования проведены в рамках Российско-германской экспедиции “Лена” в 2017 г.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Лагуна Уомуллах-Кюэль расположена на п-ове Быковский в юго-восточной части моря Лаптевых (рис. 1). Она образована на месте термокарстовой котловины размером 2.3 × 1.0 км. Берега лагуны сложены верхнеоплейстоценовыми отложениями ледового комплекса. Механизм образования этой лагуны типичен для региона, когда в результате термоабразии разрушается перемычка между морем и термокарстовой котловиной.

Район исследований относится к зоне многолетнемерзлых пород сплошного распространения, мощность которых на суше и на шельфе достигает нескольких сотен метров. Температура ММП на подошве слоя годовых колебаний на едоме составляет около -11 °С, а в пределах аласных котловин

-9 °С [Куницкий, 1989; Kotlyakov, Khromova, 2002]. Современная поверхность п-ова Быковский сформирована термокарстом, термоэрозией и термоабразией побережья. Для этого места характерны едомные холмы высотой около 20 м, в редких случаях до 40 м над ур. моря, многочисленные озера и термокарстовые депрессии (аласы) [Слагода, 2004; Grosse et al., 2005, 2007].

Согласно имеющимся данным [Слагода, 2004], отложения на южном берегу полуострова представлены нижнечетвертичными флювиальными крупнозернистыми песками и гравием с растительными остатками, имеющими преимущественно массивную криотекстуру, которые перекрыты отложениями ледового комплекса, представленными пылеватым песком, гравием и супесями с полосчатой криотекстурой.

В 2017 г. в лагуне Уомуллах-Кюэль проводились научные исследования Российской-германской экспедицией, включающие бурение скважины со льда [Strauss et al., 2018; Jenrich et al., 2021]. Одной из целей их было изучение процесса оттаивания ММП в подводных условиях. Для этого в лагуне была пробурена скважина с отбором керна (рис. 2). Глубина бурения составила 33.5 м, при



Рис. 1. Схема расположения лагуны Уомуллах-Кюэль на полуострове Быковский.

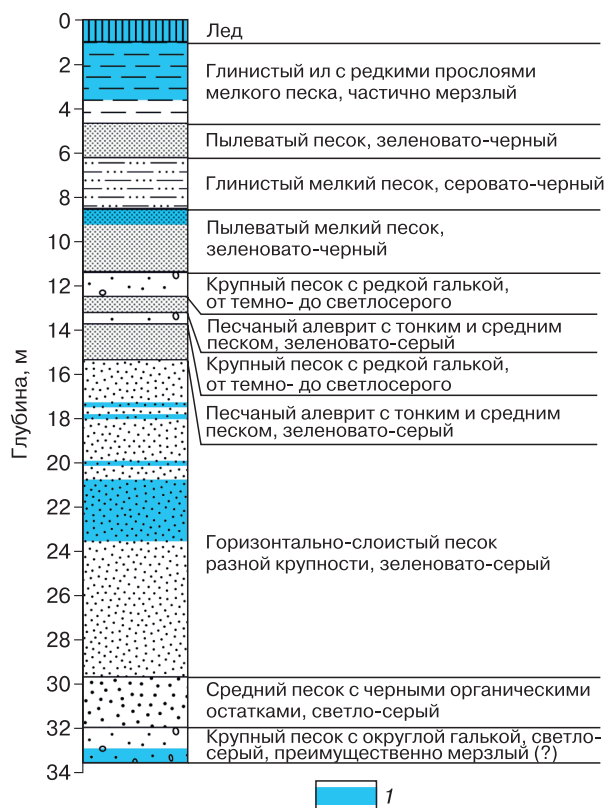


Рис. 2. Разрез по скважине PG2410 в лагуне Уомуллах-Кюэль (по [Strauss et al., 2018] с упрощениями).

1 – мерзлые породы.

этом толщина льда была равна 1.2 м. На глубине 33.5 м бурение было остановлено по техническим причинам из-за резкого возрастания сопротивления пород разрушению. Скважина вскрыла чередование мерзлых и охлажденных отложений, поэтому положение подошвы многолетнемерзлых пород по данным бурения было не очевидно.

По измерениям в скважине температура пород варьировала от -3.2 °С на глубине 4 м до -5.08 °С на глубине 29 м. Таким образом, по данным бурения и термометрии под дном лагуны установлены охлажденные породы в реликтовом талике, его образование связано не только с термическим воздействием воды, но и с диффузией соли, за счет которой многолетнемерзлые донные отложения трансформируются в образования, содержащие переохлажденный солевой поровый раствор [Анисимов и др., 2012].

Лабораторные исследования на образцах керн-а и определение температуры начала замерзания (T_{bf}) поровых растворов показали, что с глубины 20.4 м и до забоя скважины температура пород ниже, чем T_{bf} [Jenrich et al., 2021], т. е. с этой глубины в порах содержится лед.

МЕТОДИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электроразведочные исследования выполнялись в два этапа: в зимний период со льда проводились работы методом ЗСБ, а в летний период с поверхности воды с выходом на сушу выполнялись зондирования методом электротомографии (ЭТ) (рис. 3).

Измерения методом ЗСБ выполнены с помощью двухканальной аппаратуры FastSnap оператором А.Е. Плотниковым. Первичное электромагнитное поле возбуждалось генераторной петлей размером 50×50 м, при этом сила тока изменялась от 0.2 до 5 А. При измерениях один канал использовался для записи тока в генераторной петле и таким образом контролировалось время выключения импульса. При обработке данных на половину этого времени сдвигалась переходная характеристика, измеренная в приемной петле. Для измерения вторичного поля применялась соосная установка с одновитковой петлей размером 18×18 м. Решение обратной задачи электромагнитных зондирований в рамках одномерной резистивной модели выполнено Е.Ю. Антоновым с помощью программы ТЕМ-IP [Антонов и др., 2014]. При подборе теоретической кривой начальное время переходного процесса обрезалось до 50 мкс.

Поляризуемость слоев модели не подбиралась, так как на кривых становления поля отсутствовали признаки индукционно-вызванной поляризации.

Исследования методом электротомографии проведены в летний период двумя модификациями – наземной и морской. Измерения с поверхно-

сти воды выполнялись с помощью аппаратуры Syscal Deep Marine с использованием плавающих кабелей. Установка состояла из двух токовых электродов и 11 потенциальных (приемных) электродов, расположенных в обратной конфигурации Веннера–Шлюмберже (МАНВ). Расстояние между электродами составляло 10 м, а максимальный размер установки был равен 120 м. Измерения вдоль профиля выполнены примерно через 5 м с привязкой на местности по GPS с помощью прибора Garmin 421s с погрешностью менее 3 м. Плавающую косу буксировали при помощи небольшой надувной лодки, которая была оснащена GPS-приемником и эхолотом для записи координат зондирования и глубины воды. Кроме того, были выполнены многократные измерения проводимости воды, глубины и температуры с использованием устройства SonTek CastAway.

В зоне перехода из тундры в лагуну зондирования проведены с помощью аппаратуры Скала-48. Привязка профиля на местности осуществлялась с помощью прибора Garmin-64 с погрешностью менее 3 м. Последовательность подключения электродов соответствовала двум установкам – дипольно-осевой и симметричной Веннера, расстояние между электродами 5 м. При этом один из кабелей длиной 115 м заносился в воду и располагался на дне. Полученный массив исходных данных сшивался с исходными данными акваториальных зондирований, после чего выполнялось решение обратной задачи (инверсия) комбинированных данных.

Решение обратной задачи электротомографии осуществлялось с помощью программы Res2Dinvx64 (Geotomo Inc., Малайзия) методом робастной инверсии с автоматическими настройками программы. При обработке данных акваториальных измерений в стартовой модели задавались глубина и электропроводность воды, равная 12.5 Ом·м.

При построении геоэлектрических разрезов принято, что нулевая отметка шкалы глубины соответствует поверхности льда или воды.

Для численного моделирования измерений методом электротомографии использовалась программа ZondRes2D (автор А.Е. Каминский).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ожидалось, что по данным ЗСБ при зондировании со льда будут получены однотипные кривые кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_z) с минимумом в средней части, который будет наблюдаться на оси времени на малых значениях t при неглубоком залегании кровли ММП, а по мере увеличения глубины талика будет происходить смещение экстремума на кривой ρ_z в поздние времена. Однако наши ожидания оправдались только в первом случае, когда глубина талика минимальная (рис. 4, а). Например, кривая в

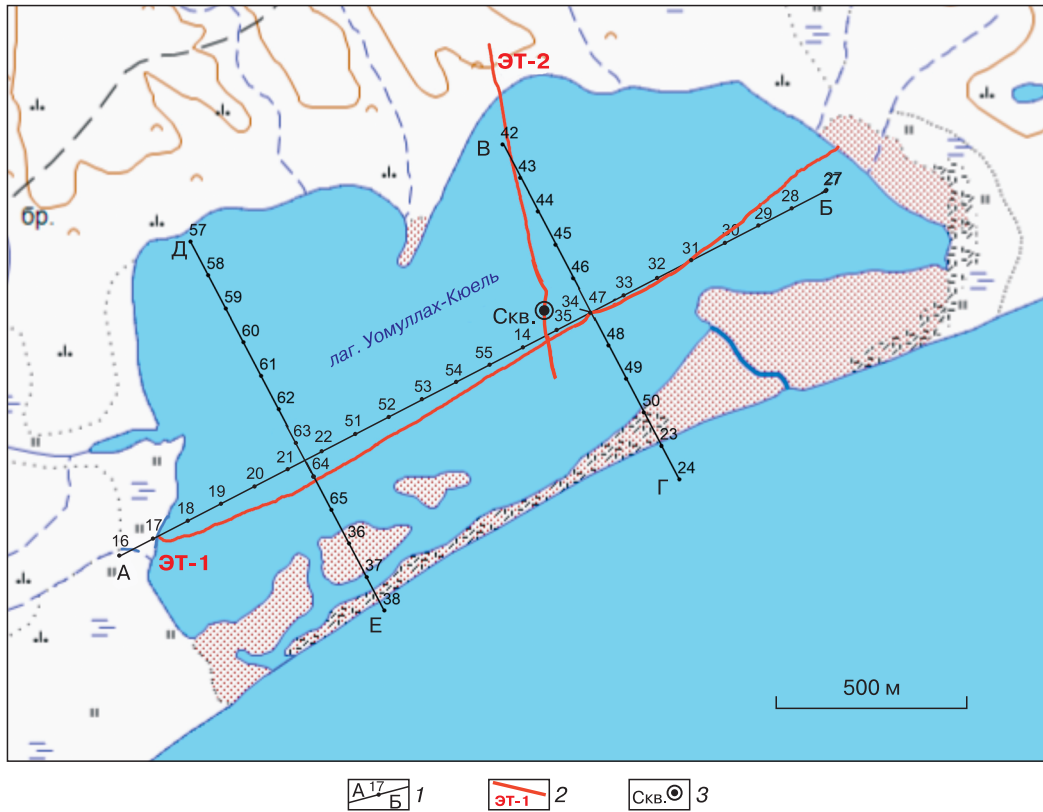


Рис. 3. Схема расположения геофизических профилей.

1 – профили и пункты ЗСБ; 2 – профиль электротомографии и его номер; 3 – скважина.

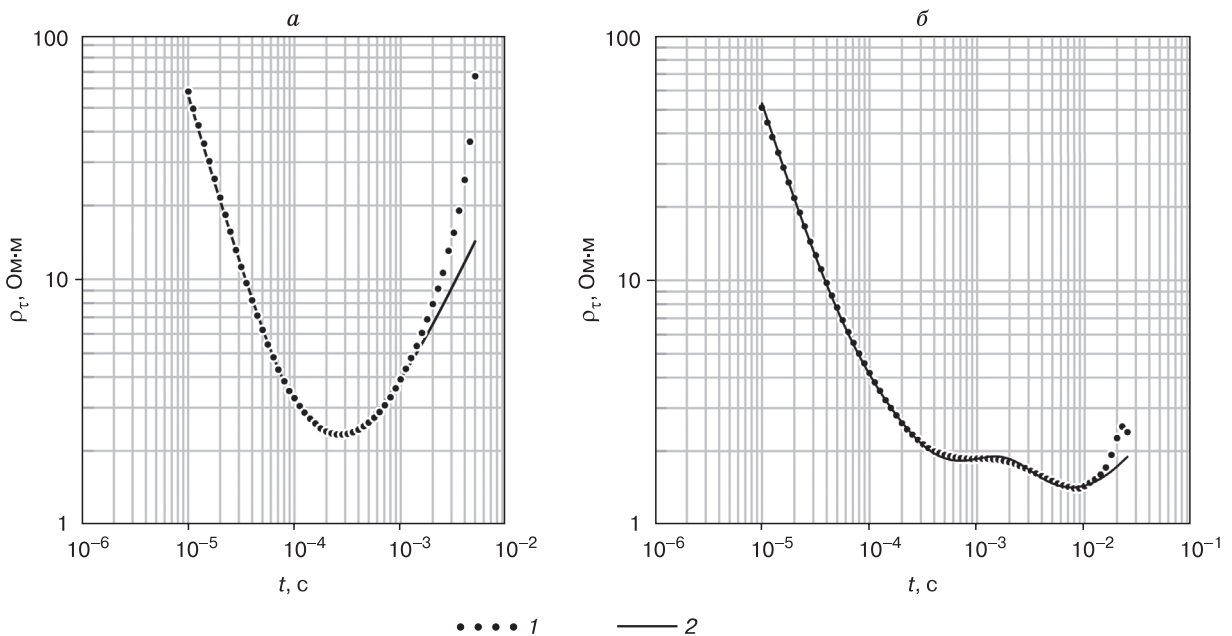


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления (ρ_{τ}) по данным ЗСБ в точках 22 (а) и 35 (б) и соответствующие им одномерные модели УЭС и мощности (H) слоев:

а: $\rho = 300, 1.3, 495 \text{ Ом}\cdot\text{м}, H = 1.4, 11.5, \infty \text{ м}, R = 7.3 \%$; б: $\rho = 799, 357, 0.61, 658 \text{ Ом}\cdot\text{м}, H = 2.9, 26, 22, 34.5, \infty \text{ м}, R = 2.9 \%$.
1 – измеренные данные; 2 – подобранная кривая.

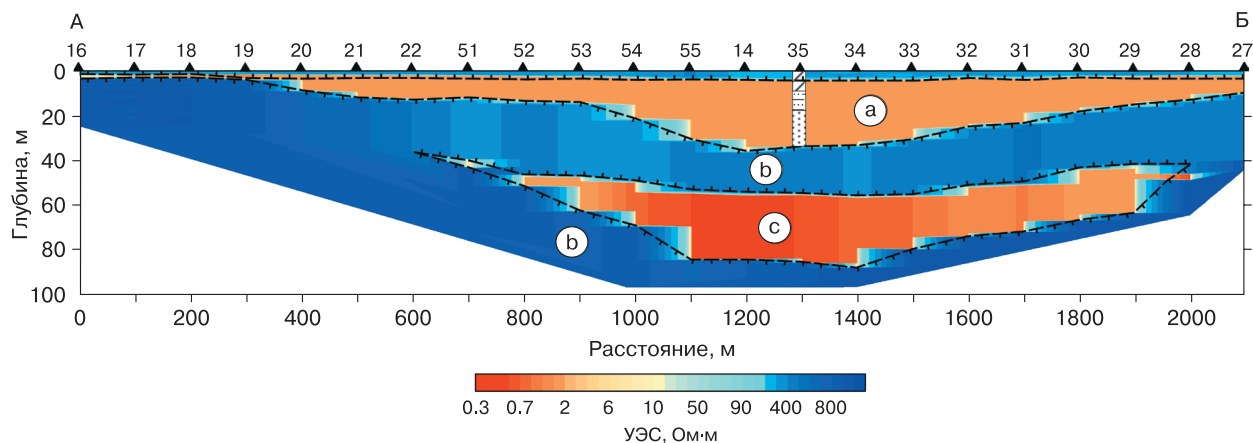


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по линии А–Б по данным ЗСБ.

1 – илы; 2 – переслаивание глинистых и пылеватых песков; 3 – песок разнозернистый горизонтально-слоистый; 4 – пункты ЗСБ; 5 – граница мерзлых пород по данным ЗСБ; а – современный талик; б – многолетнемерзлые породы; с – реликтовый талик.

точке 22 имеет относительно простую форму и отражает трехслойное строение разреза с проводящим средним слоем. Резкое возрастание ρ_t после 0.001 с происходит вследствие неглубокого залегания слоя изолятора (мерзлых пород). Кривая ρ_t в середине лагуны (точка 35) имеет сложную форму и отражает пятислойное, а не трехслойное строение разреза, что оказалось весьма неожиданным.

Результаты одномерной инверсии показали, что на геоэлектрическом разрезе по длинной оси лагуны (линия А–Б на рис. 3) в верхней части разреза выделяется слой с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 1.2–1.8 Ом·м, мощность которого изменяется от 2–10 м в краевых частях профиля до 30 м в центре (рис. 5). Этот слой интерпретируется как засоленные породы при отрицательной температуре. Ниже залегают породы с УЭС 400–500 Ом·м, предположительно незасоленные мерзлые, что согласуется с результатами бурения. А в интервале глубин 50–85 м выделяется еще один слой с низким УЭС (0.5–1.2 Ом·м). Столь низкое электросопротивление означает повышение солености пород на этой глубине.

Предполагается, что второй слой низкого УЭС связан с существованием реликтового талика под термокарстовой котловиной. Однако низкое УЭС пород в реликтовом талике требует объяснений, так как палеозеро было пресным.

На разрезе УЭС по линии В–Г прослеживается изменение строения по направлению от береговой линии до границы лагуны и моря (рис. 6, а). При этом УЭС промежуточного слоя мерзлых пород понижается в 10 раз, что, вероятно, связано как с повышением температуры, так и с увеличе-

нием засоленности пород вследствие диффузии соли со стороны моря. На этом же разрезе видно, что слой низкого УЭС, интерпретируемый как реликтовый талик, непрерывно прослеживается в направлении границы лагуны и моря. Следовательно, существует гидравлическая связь между породами реликтового талика и породами, расположенными под современным морем.

Термокарстовая котловина, в которой образовалась лагуна Умуллах-Кюель, имеет сложную форму и, вероятно, образована слиянием двух котловин меньших размеров. Этот вывод следует из анализа разреза УЭС по линии Д–Е через юго-западную часть лагуны (см. рис. 6, б). На этом разрезе слоем низкого УЭС выделяется только современный талик, развитый до глубины 10 м. Мы предполагаем, что эта часть котловины имеет более молодой возраст, чем северо-восточная.

Между пунктами ЗСБ 65 и 38, где профиль Д–Е пересекает песчаную косу (см. рис. 6, б), прослеживается повышенная глубина сезонного промерзания отложений и тонкий слой охлажденных пород с низким УЭС, подстилаемый с глубины 6 м высокоомными ММП. Это говорит о том, что здесь была краевая часть котловины и талик имел меньшую мощность, чем в центральной части. В то же время на разрезе по линии В–Г между пунктами ЗСБ 50 и 24 под отложениями косы глубина залегания кровли ММП оценивается в 26.5–17.5 м, что означает наличие достаточно глубокого талика.

Сопоставление данных зимних электромагнитных и летних электрических зондирований показало, что положение кровли ММП по данным

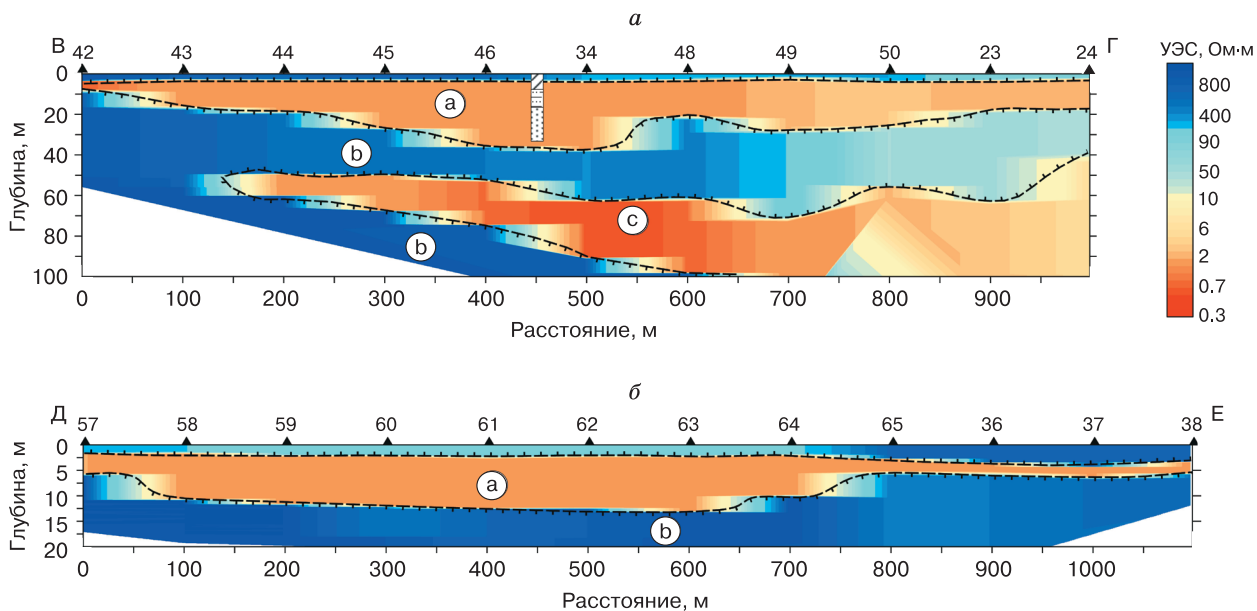


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по линиям В–Г (а) и Д–Е (б) по данным ЗСБ.

Условные обозн. см. на рис. 5.

ЗСБ согласуется с границей изменения УЭС по данным электротомографии (рис. 7). Однако по данным ЭТ эта граница менее контрастна, и по мере погружения она выделяется менее уверенно. УЭС охлажденных пород в талике по данным двух

методов определяется примерно одинаково (0.9–1.5 Ом·м), но УЭС подстилающих ММП по инверсии ЭТ занижено и равно 15–300 Ом·м, в то время как по методу ЗСБ УЭС этих пород составляет 350–900 Ом·м.

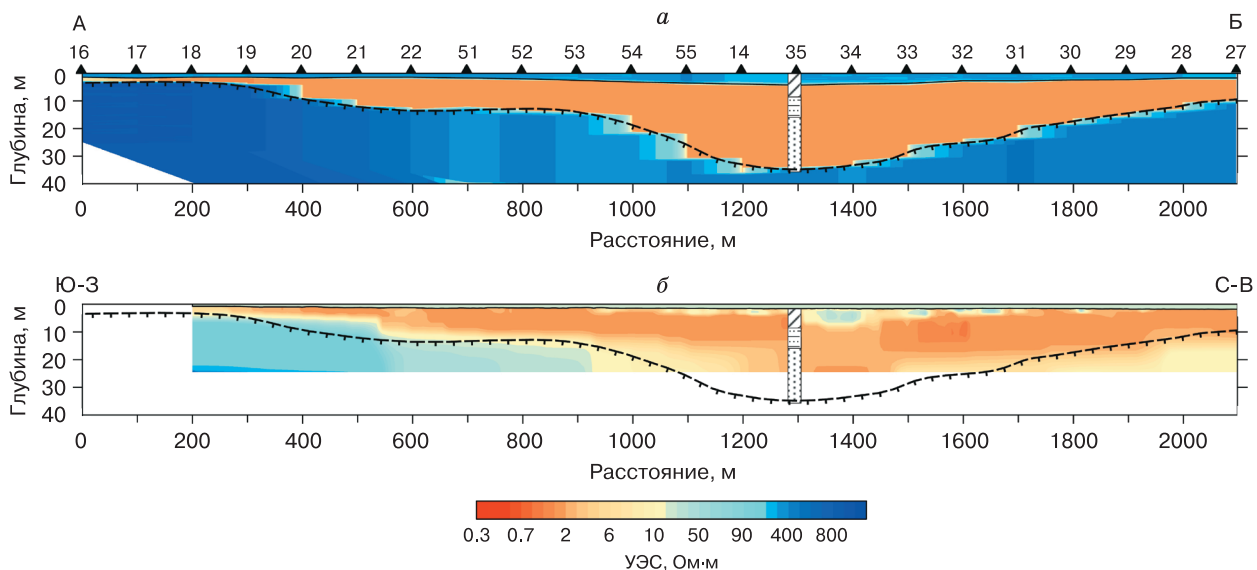


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по данным зимних измерений методом ЗСБ (а) и акваторной электротомографии по профилю ЭТ-1 (б).

Условные обозн. см. на рис. 5.

Для дополнительной верификации данных электротомографии было выполнено численное моделирование. С помощью программы Zond-Res2D была составлена модель разреза (рис. 8, а), в которой под слоем воды глубиной 1.5 м и УЭС 14 Ом·м залегают илистые опресненные отложения мощностью 2 м с УЭС 20 Ом·м. Этот слой с относительно низкой электропроводностью поровой воды (30 мСм/см) установлен в результате опробования керна [Jenrich et al., 2021]. Ниже залегают засоленные охлажденные породы с УЭС 1.5 Ом·м переменной мощности. Электропроводность поровой влаги в этих породах достигает 80–100 мСм/см [Там же]. Они подстилаются многолетнемерзлыми песками с УЭС 500 Ом·м, кровля которых погружается от 5 до 13 м в центральной части разреза и до 26.7 м в конце разреза.

Затем с помощью этой же программы было рассчитано “наблюдаемое” поле кажущегося сопротивления ρ_k (см. рис. 8, б) для измерений сим-

метричной установкой Шлюмберже кабелем с 13 электродами с шагом 10 м. Эти данные без зашумления подавались на вход программы Res2-Dinvx64 (автор М.Н. Локе) для решения обратной задачи. В результате рассчитан теоретический разрез ρ_k (см. рис. 8, в) и подобрана соответствующая ему геоэлектрическая модель (см. рис. 8, г). При инверсии указывалось, что система измерений плавающая, а в стартовой модели закреплялся слой воды известной толщины и УЭС. После шести итераций ошибка подбора составила 1.2 %.

На восстановленной модели видно (см. рис. 8, г), что положение кровли многолетнемерзлых пород определяется неявно, так же как и на реальных полевых данных (см. рис. 7, б). При этом УЭС высокоомного основания сильно занижено. Например, там, где глубина кровли ММП составляет 5 м, восстановленное электросопротивление мерзлых пород изменяется в пределах 50–200 Ом·м, что меньше УЭС мерзлых пород в ис-

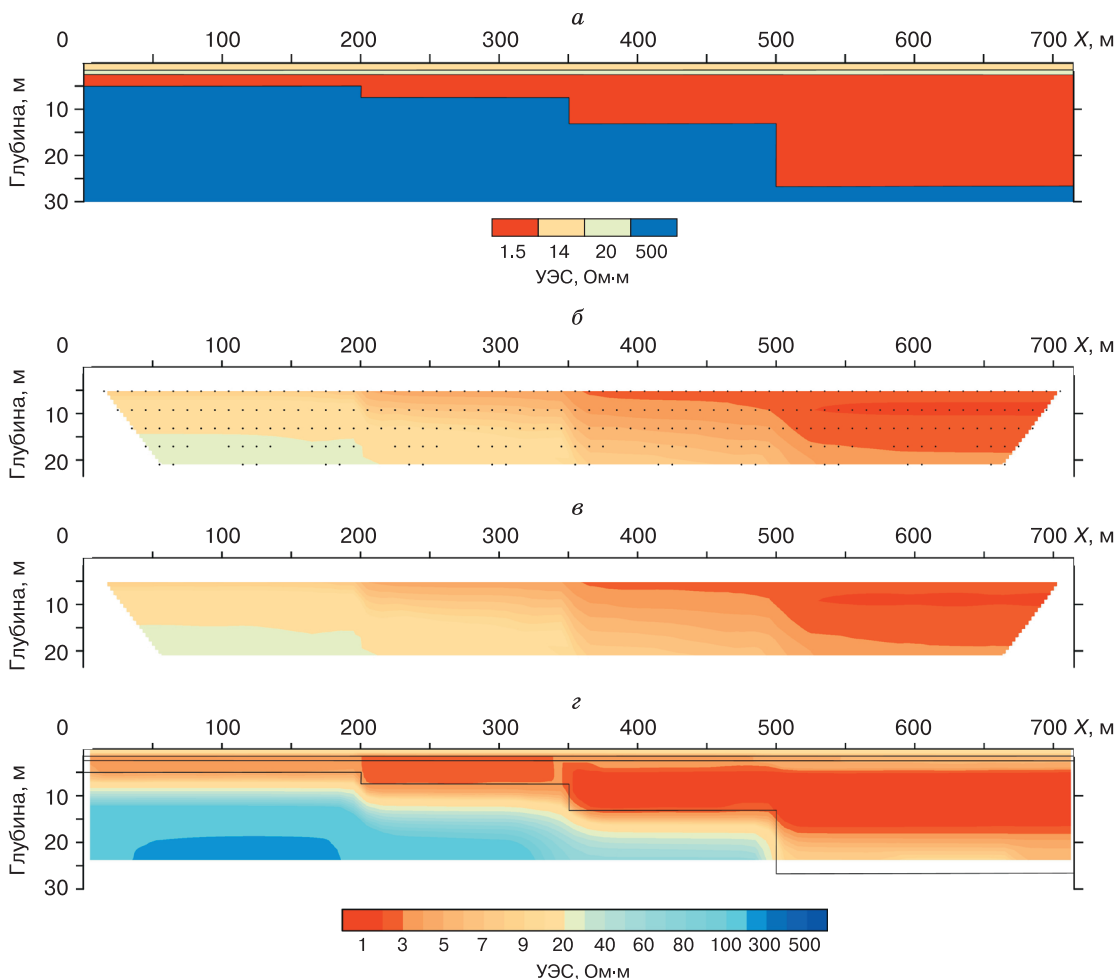


Рис. 8. Геоэлектрическая модель субквальной криолитозоны с таликом переменной мощности (а), разрез наблюдаемого кажущегося сопротивления (б), рассчитанный разрез кажущегося сопротивления (в), восстановленная геоэлектрическая модель (г).

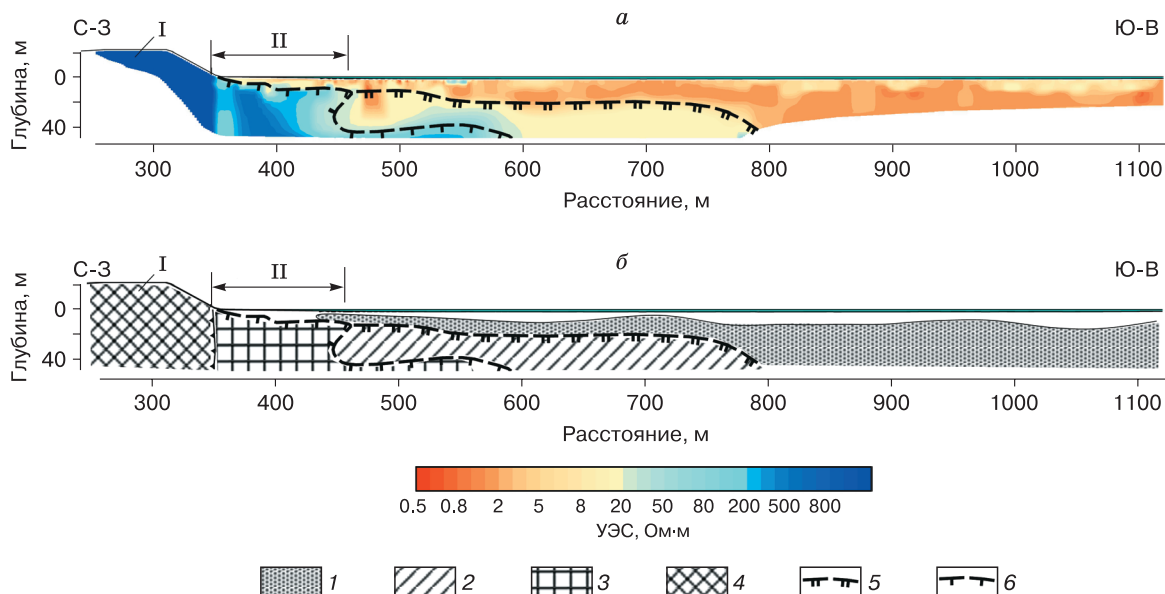


Рис. 9. Геоэлектрический разрез по комбинированным данным наземной и акваториальной электромиграции по профилю ЭТ-2 (а) и его интерпретация (б).

I – мерзлые низкотемпературные отложения едомы и подстилающие породы; II – участок субаквальной мерзлой толщи после разрушения едомы; 1 – область высокоминерализованных поровых растворов; 2 – область мерзлых пород при температуре, близкой к T_f ; 3 – область ММП с повышенной температурой; 4 – низкотемпературные ММП; 5 – граница между охлажденными породами и ММП с температурой, близкой к T_f ; 6 – граница между засоленными и незасоленными ММП.

ходной модели в 2.5–10 раз. В конце разреза, где глубина залегания кровли ММП в модели составляет 26.7 м, на восстановленном геоэлектрическом разрезе видно, что глубинности зондирования установкой длиной 120 м не хватает для определения положения границы мерзлых пород, как и в полевых данных (см. рис. 7, б).

Численное моделирование показало, что акваториальный вариант электротомографии с плавающим кабелем из 13 электродов с шагом 10 м в условиях засоленного разреза можно применять для определения кровли субаквальных ММП до глубин около 15 м. При этом УЭС мерзлых пород получается заниженным.

При переходе от субаэральной к субаквальной криолитозоне происходит закономерное изменение геоэлектрического строения разреза (рис. 9, а). Сильнольдистые породы едомы (I на рис. 9, б) выделяются по УЭС более 10 000 Ом·м. В прибрежной зоне на протяжении 90 м мерзлые породы имеют УЭС 250–500 Ом·м, что, вероятно, связано с ее повышенной температурой, при этом на разрезе УЭС проявляется характерная аномалия в форме козырька. По-видимому, выделенный интервал профиля II еще несколько десятков лет назад находился под отложениями едомы, так как эти мерзлые породы перешли в реликтовое субаквальное состояние после отступления береговой линии. Породы с сопротивлением 10–20 Ом·м интерпретируются как область мерзлых пород при

температуре, близкой к температуре начала замерзания (T_f). Хотя, как показало численное моделирование, к таким выводам необходимо относиться с осторожностью, так как УЭС мерзлых пород под тальми или охлажденными определяется сильно заниженным. Отложения с низким УЭС (около 1 Ом·м), вероятно, представлены илистыми песками с высокоминерализованными поровыми растворами, находящимися при отрицательной температуре.

По мере продвижения по профилю от берега в акваторию УЭС пород мерзлого основания закономерно понижается с 250–500 до 10–40 Ом·м, что, возможно, связано с изменением свойств мерзлых пород при засолении и повышении температуры. Однако, как показало численное моделирование, к такому же эффекту понижения УЭС приводит постепенное погружение границы мерзлых пород (см. рис. 8, з).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты геофизических исследований показали, что по данным ЗСБ в контуре лагуны Умуллах-Кюель многолетнемерзлая толща имеет сложное строение, которое связано с существованием реликтового талика и современного талика. С учетом результатов ранее проведенных акваторных зондирований методом ЭТ в море Лаптевых [Angelopoulos et al., 2021] была оконту-

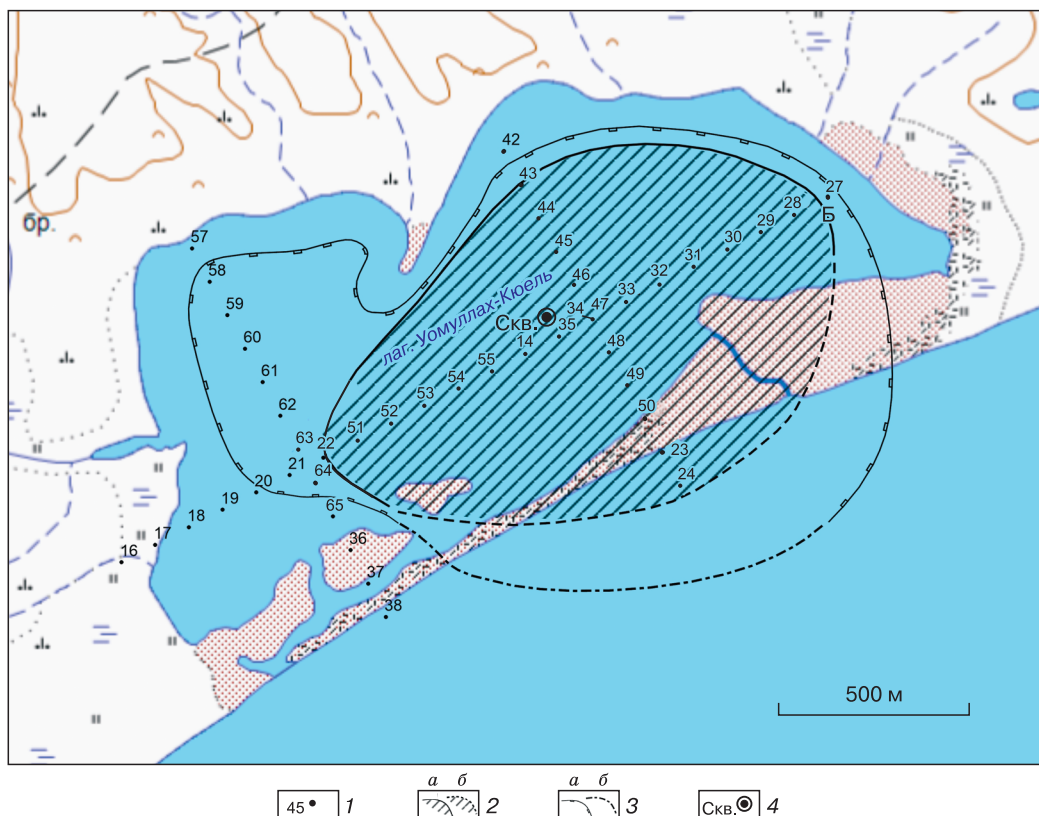


Рис. 10. Границы современного и реликтового талика по геофизическим данным с учетом данных [Angelopoulos et al., 2021].

1 – пункты ЗСБ, 2 – границы реликтового талика (показан косой штриховкой), выделяемые уверенно (а) и предполагаемые (б); 3 – границы современного талика глубиной более 10 м, выделяемые уверенно (а) и предполагаемые (б); 4 – скважина.

рена граница современного субаквального талика глубиной более 10 м (рис. 10). Кроме того, оценены размеры реликтового талика, которые приблизительно должны совпадать с границами палеозера, под которым происходило протаивание мерзлых пород. Предполагается, что размеры палеозера были не менее 1450 × 900 м.

Вероятно, глубокий талик (более 80 м) сформировался под водоемом в период голоценового потепления, который начался 12,8 тыс. лет назад [Каплина, Ложкин, 1979; Каплина, 1981] и продолжался 4–6 тыс. лет.

В соответствии с расчетами [Тумской и др., 2001а,б] под озером радиусом 1500 м при мощности ледового комплекса 40 м талик глубиной 80–100 м развивается за 4,3–7,3 тыс. лет. Вероятный радиус палеозера Умуллах-Кюэль по длинной оси составлял не менее 1450 м. В работе [Тумской и др., 2001б] показано, что при радиусе озера более 800 м положение подошвы талика не зависит от размеров последнего. То есть результаты теоретических расчетов максимальной глубины протаивания, выполненные В.Е. Тумским с соавторами,

применимы и для палеозера Умуллах-Кюэль. При этом глубина реликтового талика, установленная по геофизическим данным (80–100 м), соответствует порядку глубины, полученной в результате теоретической оценки.

После окончания сартанского криохрона началось потепление, а интенсивное развитие термокарста происходило 14–12,5 тыс. лет назад [Гаврилов и др., 2006]. Затем, в позднем голоцене произошло похолодание, которое длилось 3–4,5 тыс. лет [Ершов, 2002].

По данным радиоуглеродного анализа образцов с глубины 4,8 м возраст голоценовых отложений термокарстового озера на месте лагуны Умуллах-Кюэль оценивается в 10,5 тыс. лет [Jenrich et al., 2021]. Примерно в это же время произошел спуск озера, что было установлено по беспорядочному изменению удельной магнитной восприимчивости образцов керна, указывающего на поступление осадка извне как минимум дважды [Там же]. Дренаживание термокарстового озера стало причиной частичного промерзания талых отложений на дне аласной котловины и повторно-

го образования ММП. Судя по геоэлектрическим разрезам (см. рис. 5; 6, а), промерзание достигло глубины 33–47 м. В настоящее время в отложениях лагуны Уомуллах-Кюель происходит развитие области охлажденных пород в том числе за счет диффузии [Angelopoulos et al., 2020] и(или) конвекции соли [Shakhova et al., 2017]. Современный талик и охлажденные породы фиксируются по данным ЗСБ как первый от поверхности слой низкого УЭС. Схема начального образования талика, его промерзания после дренажа озера и деградации мерзлой толщи в результате влияния соленой воды после трансгрессии моря и термоабразии показана на рис. 11.

Разрушение мерзлой перемычки со стороны моря стало причиной поступления соленой воды в реликтовый талик. Этим объясняется столь низкое УЭС пород реликтового талика, который контрастно выделяется на геоэлектрических разрезах по данным ЗСБ (см. рис. 5; 6, а).

Существенную роль в образовании современного талика играет диффузия соли. В статье [Angelopoulos et al., 2019] показано, что по расчетам для п-ова Быковский за 1400 лет без влияния соли кровля субаквальных мерзлых пород опустится на глубину 12.3 м, а при диффузии соли глубина оттаивания составит 16.7 м.

По данным бурения в лагуне Уомуллах-Кюель вскрыто несколько слоев пород, содержащих лед. Температура всего разреза была отрицательной, и без электроразведочных данных не было бы понимания строения талика, так как мерзлые породы, вскрытые на забое, могли быть очередным прослоем мерзлоты. В статье [Jenrich et al., 2021] приведены расчеты температуры начала заморзания поровой воды, взятой из образцов керна скважины, в зависимости от солёности. В свою очередь, содержание солей было определено по электропроводности поровой воды. Расчеты показали, что поровая вода переходит в твердое состояние с глубины 20.5 м, где температура пород достигает $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а рассчитанная величина T_{bf} поровой воды изменяется от -3.8 до $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным электромагнитных зондирований в точке 35, расположенной в 50 м от скважины, глубина залегания мерзлых пород оценивается в 29 м.

На данный момент нет объяснения расхождению в определении глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород методом ЗСБ и по результатам определения T_{bf} поровых растворов. С одной стороны, электромагнитные зондирования весьма чувствительны к низкоомным средам и с достаточно высокой точностью определяют мощность первого проводящего слоя. С другой стороны, нет оснований не доверять результатам лабораторного определения T_{bf} поровых растворов из образцов керна. Возможно, при промерзании

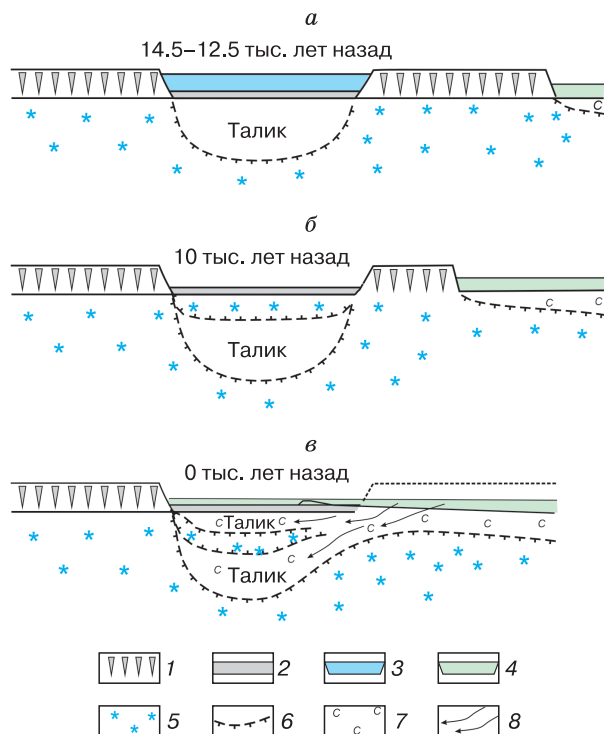


Рис. 11. Схема образования (а) и промерзания (б) подозерного талика после дренажа озера и трансформации мерзлой толщи в результате перехода в субмаринное состояние (в) в пределах лагуны Уомуллах-Кюель.

1 – едома; 2 – озерные отложения; 3 – пресная вода; 4 – соленая вода; 5 – мерзлые породы; 6 – граница мерзлых пород; 7 – засоленные отложения; 8 – инфильтрация соленой воды.

отложений происходит криогенное концентрирование растворенных солей в поровых растворах, что приводит к дополнительному понижению T_{bf} растворов. Либо в диапазоне глубин 20.4–30 м разрез представляет собой чередование охлажденных и мерзлых пород.

С помощью численного моделирования мы показали, что при использовании стандартной плавающей системы наблюдения Marin Pro, состоящей из 13 электродов с шагом 10 м, возможно определение положения кровли субаквальных многолетнемерзлых пород до глубины 15 м. Но восстановленное по результатам инверсии сопротивление получается сильно заниженным. К такому же выводу пришли авторы работы [Arboleda-Zapata et al., 2022] на основе анализа полевых данных акваторных измерений в море Лаптевых у п-ова Быковский и численного моделирования. Они показали, что введение в модель слоя воды с известными глубиной и сопротивлением уменьшает неоднозначность обратной задачи ЭТ, улучшая оценку удельного сопротивления незамерз-

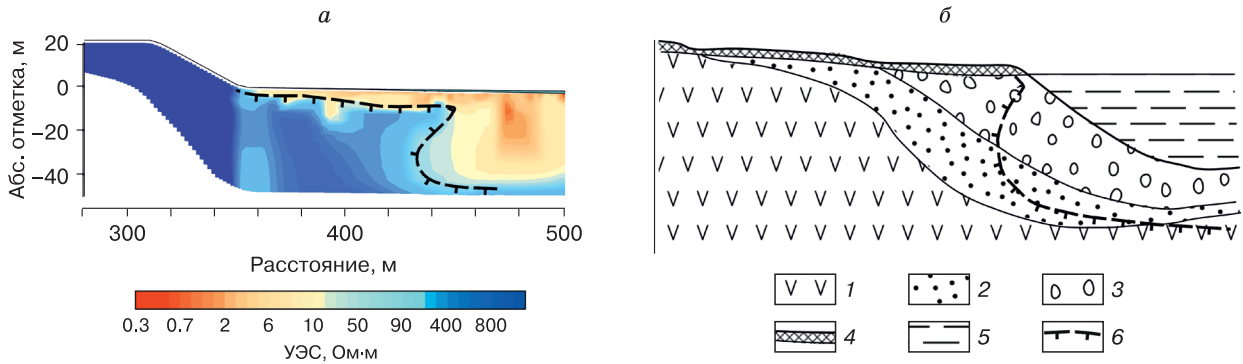


Рис. 12. Фрагмент геоэлектрического разреза (см. рис. 9) в зоне перехода от субаэральной к субаквальной ММП (а) и схема мерзлотного козырька (б) (по [Катасонов, 1962] с упрощениями).

1 – коренные породы; 2 – донные осадки первой генерации; 3 – донные осадки второй генерации; 4 – сезонноталый слой; 5 – вода; 6 – граница ММП.

ших отложений (талика и(или) криопэга) и положение кровли мерзлых пород. Однако даже при ограничении в модели параметров водного слоя они все равно обнаружили большие колебания УЭС мерзлых отложений. Для более точного определения удельного сопротивления мерзлого слоя с целью оценки льдистости мерзлых пород авторы предлагают фиксировать при инверсии и сопротивление талых отложений, которое можно определить в результате измерений на образцах. Мы полагаем, что для повышения точности определения сопротивления субаквальной толщи можно использовать не плавающие, а донные кабели, как это сделано в работе [Бобачёв и др., 2022].

Особенностью строения субаквальных мерзлых пород лагуны в прибрежной зоне является аномалия повышенного УЭС в виде козырька. Эта аномалия соответствует мерзлотному козырьку, который обычно образуется по берегам водоемов и является следствием промерзания на мелководье и тепляющего действия воды на глубине (рис. 12).

Мерзлотные козырьки характерны для краевых частей термокарстовых котловин. В результате частичного дренирования озер происходят промерзания с поверхности и сбоку отложений подозерных таликов в их прибрежной части и формирование козырьков мерзлых пород [Рекант и др., 2009]. В нашем случае образование козырька происходит на участке мелководья, образованном в процессе термоабразии. Здесь из-за малой глубины в зимний период лед ложится на дно, что обеспечивает интенсивное охлаждение нижележащих пород. Со стороны глубокой воды происходит растепление ММП, в том числе из-за диффузии соли. Сочетание этих разнонаправленных процессов приводит к образованию мерзлотного козырька.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лагуна Уомуллах-Кюель является типичным для побережья моря Лаптевых объектом, поэтому с учетом полученной при бурении скважины информации о геокриологическом строении разреза лагуна является эталоном для электроразведочных исследований субаквальной криолитозоны. В то же время даже существующая информация по разрезу скважины не давала полного представления о строении мерзлой толщи под акваторией лагуны, и только результаты электромагнитных зондирований позволили получить дополнительные данные для составления модели трансформации криолитозоны после перехода в субмаринное состояние.

В результате электромагнитных зондирований установлено, что в геоэлектрическом разрезе лагуны выделяются два слоя пород с низким УЭС: верхний слой соответствует современному талику с охлажденными породами, а нижний слой интерпретируется как реликтовый талик. Согласно геофизическим данным и результатам бурения, область охлажденных пород развилась до глубины 20.4–30 м, в том числе благодаря диффузии и(или) конвекции соли из морской воды.

Реликтовый талик выделен до глубины 80–100 м, что согласуется с результатами теоретических расчетов глубины оттаивания, выполненных другими исследователями. На основе интерпретации данных ЗСБ получено, что размеры палеоозера, под которыми формировался талик, составляли 1450 × 900 м. Низкое УЭС реликтового талика связано с инфильтрацией соленой воды со стороны моря в результате деградации мерзлой толщи между термокарстовой котловиной и морем в процессе трансгрессии.

Зондирования методом электротомографии с поверхности воды показали согласованную с ре-

зультатами метода ЗСБ границу мерзлых пород, однако их УЭС существенно занижено даже при относительно неглубоком их залегании, что подтверждается результатами численного моделирования.

В зоне перехода от субаэральной к субаквальной криолитозоне по данным электротомографии на геоэлектрических моделях отображаются мерзлотные козырьки – особенность строения мерзлых пород у береговой линии неглубоких водоемов. При этом постепенное понижение УЭС мерзлых пород в направлении от берега в акваторию лагуны, возможно, отражает увеличение степени засоления пород и повышение их температуры, т. е. трансформацию подводной мерзлоты при наступлении моря.

Благодарности. Авторы благодарны главному научному сотруднику ИНГГ СО РАН, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонову за помощь в интерпретации данных электромагнитных зондирований.

Работа выполнена в рамках исследований Российской-германской экспедиции “Лена” в 2017 г. и при финансовой поддержке проекта FWZZ-2022-2024 “Геоэлектрические и электромагнитные методы исследования верхней части земной коры: теория, модели, эксперимент”.

Литература

- Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Лавров С.А., Стрельченко Ю.Г. Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и снег, 2012, № 2, с. 97–105.
- Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Корсаков М.А. Автоматизированная система для интерпретации данных индукционных импульсных электромагнитных зондирований с учетом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 8, с. 1282–1293.
- Бобачев А.А., Миринец А.К., Миролюк С.Г. Опыт применения донной электротомографии в Обской губе Карского моря // Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022: Тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 24–28 окт. 2022 г.). Тверь, ПолиПРЕСС, 2022, т. IV, с. 141–144.
- Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 39–50.
- Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Романовский В.Е. Распространение островов – реликтов ледового комплекса – на Восточно-Сибирском арктическом шельфе // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 18–32.
- Ершов Э.Д. Общая геокриология. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
- Зыков Ю.Д., Кошуриков А.В., Пушкарев П.Ю. Применение частотного электромагнитного зондирования при проектировании газопроводов // Инж. изыскания, 2008, № 3, с. 70–74.
- Казанин А.Г., Павлов С.П., Науменко Д.А. и др. Комплексирование сейсморазведки 2D и электроразведки ЗСБ для исследования криолитозоны на шельфе арктических морей // 12-я науч.-практ. конф. и выставка “Инженерная геофизика 2016” (Анапа, 25–29 апр. 2016 г.). Анапа, Европ. ассоциация геологов и инженеров (EAGE), 2016, с. 482–00039.
- Каплина Т.Н. История мерзлых толщ Северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М., Наука, 1981, с. 153–181.
- Каплина Т.Н., Ложкин А.В. Возраст аласных отложений Приморской низменности Якутии (радиоуглеродное обследование) // Изв. АН СССР. Сер. Геология, 1979, № 2, с. 69–76.
- Касымская М.В. Субмаринные талики восточной части шельфа моря Лаптевых // Пространство и время, 2012, № 1, с. 133–140.
- Катасонов Е.М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жили как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений // Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений / Под ред. С.П. Качурина. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 37–44.
- Колобакин А.А., Миролюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инж. изыскания, 2016, № 10–11, с. 38–51.
- Кошуриков А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е. и др. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Докл. РАН, 2016, т. 469, № 5, с. 616–620.
- Куницкий В.В. Криолитология низовья Лены. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1989, 162 с.
- Малахова В.В., Голубева Е.Н. Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. // Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 61–72.
- Рекант П.В., Тумской В.Е., Гусев Е.А. и др. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 332–348.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др. Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 79–91.
- Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 3–14.
- Слагода Е.А. Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень, Экспресс, 2004, 119 с.
- Тумской В.Е. Термокарст и его роль в развитии региона моря Лаптевых в позднем плейстоцене и голоцене: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2002, 26 с.
- Тумской В.Е., Романовский Н.Н., Типенко Г.С. Результаты моделирования протаивания отложений ледового комплекса под термокарстовыми озерами на северо-востоке Якутии // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001а, т. 2, с. 300–307.
- Тумской В.Е., Романовский Н.Н., Типенко Г.С. Формирование таликов под термокарстовыми озерами на северо-востоке Якутии: результаты моделирования // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001б, т. 2, с. 293–300.

Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натуральных наблюдений // Докл. РАН, 2009, т. 429, № 4, с. 541–544.

Angelopoulos M., Overduin P.P., Jenrich M. et al. Onshore thermokarst primes subsea permafrost degradation // *Geophys. Res. Lett.*, 2021, vol. 48 (20), e2021GL093881.

Angelopoulos M., Overduin P.P., Westermann S. et al. Thermokarst lake to lagoon transitions in Eastern Siberia: Do submerged taliks refreeze? // *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 2020, vol. 125, No. 10, p. 2019005424.

Angelopoulos M., Westermann S., Overduin P.P. et al. Heat and salt flow in subsea permafrost modeled with CryoGRID2 // *J. Geophys. Res.:* Earth Surf., 2019, vol. 124, p. 920–937.

Arboleda-Zapata M., Angelopoulos M., Overduin P.P. et al. Exploring the capabilities of electrical resistivity tomography to study subsea permafrost // *The Cryosphere*, 2022, vol. 16 (10), p. 4423–4445.

Edwards R.N., Wolfram P.A., Judge A.S. The ICE-MOSES experiment: mapping permafrost zones electrically beneath the Beaufort Sea // *Mar. Geophys. Res.*, 1988, vol. 9, No. 3, p. 265–290.

Grosse G., Schirmer L., Kunitzky V.V., Hubberten H.-W. The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: an illustration from the NE Siberian coast // *Permafrost Periglacial Process.*, 2005, vol. 16, p. 163–172.

Grosse G., Schirmer L., Siegert Ch. et al. Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary // *Geomorphology*, 2007, vol. 86 (1/2), p. 25–51.

Jenrich M., Angelopoulos M., Grosse G. et al. Thermokarst Lagoons: a core-based assessment of depositional characteristics and an estimate of carbon pools on the Bykovsky Peninsula // *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, p. 637899.

Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Russia – maps of permafrost and ground ice. Boulder, Colorado USA: National snow and ice data center. 2002 [электрон. ресурс]. – <http://nsidc.org> (дата обращения: 20.09.2015).

Overduin P.P., Westermann S., Yoshikawa K. et al. Geoelectric observations of the degradation of nearshore submarine permafrost at Barrow (Alaskan Beaufort Sea) // *J. Geophys. Res.:* Earth Surf., 2012, vol. 117, No. 2, p. F02004.

Overduin P.P., Wetterich S., Günther F. et al. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia // *The Cryosphere*, 2016, vol. 10 (4), p. 1449.

Romanovsky N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al. Thermokarst and Land-Ocean Interactions, Laptev Sea Region, Russia // *Permafrost Periglacial Process.*, 2000, vol. 11, p. 137–152.

Sellmann P.V., Delaney A.J., Arcone S.A. Coastal subsea permafrost and bedrock observations using dc resistivity // *Cold Reg. Res. and Eng. Lab. (CRREL)*, Hanover, NH, 1989, No. 89, p. 13.

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Commun.*, 2017, vol. 8, No. 1, p. 1–13.

Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115, C08007.

Strauss J., Boike J., Bolshiyakov D.Y. et al. Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2017 // *Berichte zur*

Polar-und Meeresforschung. Rep. on polar and marine res., 2018, vol. 725, p. 296.

Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K. et al. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic Sea emissions // *Sci. Advances*, 2020, vol. 6, No. 5, p. eaay7934.

Walker G.G., Kawasaki K., Osterkamp T.E. Transient electromagnetic detection of subsea permafrost near Prudhoe Bay, Alaska // *AAPG Bull.*, 1985, vol. 69, No. 4, p. 681.

References

Anisimov O.A., Borzenkova I.I., Lavrov S.A., Strelchenko Y.G. Modern dynamics of submarine permafrost and methane emission on the shelf of the Eastern Arctic seas. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2012, No. 2, p. 97–105.

Antonov E.Y., Kozhevnikov N.O., Korsakov M.A. Software for inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization. *Russ. Geol. and Geophys.*, 2014, vol. 55, No. 8, p. 1019–1027.

Bobachev A.A., Mirinets F.K., Mironyuk S.G. The underwater Electrical Resistivity Tomography experience in the Gulf of Ob of the Kara Sea. In: *Marine studies and education: Proc. of the XI Int. Conf. (Moscow, Oct. 24–28, 2022)*. Tver, “PoliPRESS” LLC, 2022, vol. IV, p. 141–144 (in Russian).

Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. Paleogeographic scenario of the postglacial transgression on the Laptev Sea shelf. *Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere]*, 2006, vol. X, No. 1, p. 39–50.

Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Romanovsky V.E. Distribution of islands – ice complex remnants of the East Siberian Arctic shelf. *Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere]*, 2003, vol. VII, No. 1, p. 18–32.

Ershov E.D. *Obshaya geokriologiya [General geocryology]*. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2002, 682 p. (in Russian).

Zykov Y.D., Koshurnikov A.V., Pushkarev P.Yu. Application of frequency electromagnetic sounding in designing of gas pipelines. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Surveys]*, 2008, No. 3, p. 70–74.

Kazanin A.G., Pavlov S.P., Naumenko D.A. et al. The combination of 2D seismic and electrical sounding for research of cryolithozone on the shelf of the Arctic seas. In: *12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016*. Anapa, Europ. Association of Geoscientists and Engineers, 2016, p. 482-00039 (in Russian).

Kaplina T.N. History of permafrost strata of Northern Yakutia in the Late Cenozoic. In: *Istoriya razvitiya mnogoletnemyorzlykh porod Evrazii [History of the development of Eurasian permafrost]*. Moscow, Nauka, 1981, p. 153–181 (in Russian).

Kaplina T.N., Lozhkin A.B. The age of alas deposits of the Primorskaya Lowland of Yakutia (Radiocarbon Survey). *Izv. Akademii Nauk SSSR [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR]*. Ser. Geology, 1979, No. 2, p. 69–76.

Kasymuskaya M.V. Submarine taliks in the eastern part of the Laptev Sea shelf. *Prostranstvo i vremya [Space and Time]*, 2012, No. 1, p. 133–140. – <https://cyberleninka.ru/article/n/submarine-taliki-vostochnoy-chasti-shelfa-morya-laptevyyh>

Katasonov E.M. Cryogenic textures, ice and soil veins as genetic signs of permafrost quaternary deposits. In: *Voprosy kriologii pri izuchenii chetvertichnykh otlozhenij [Problems of Cryology in the Study of Quaternary Deposits]*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1962, p. 37–44 (in Russian).

Kolyubakin A.A., Mironyuk S.G., Roslyakov A.G. et al. Application of complex geophysical methods for detecting hazardous geological processes and phenomena on the Laptev Sea shelf. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Surveys]*, 2016, No. 10–11, p. 38–51.

- Koshurnikov A.V., Tumskoy V.E., Shakhova N.E. et al. First experience of electromagnetic sounding for mapping of the underwater permafrost roof on the Laptev Sea shelf. *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences], 2016, vol. 469, No. 5, p. 616–620.
- Kunitsky V.V. *Kriolitologiya nizov'ya Lenu* [Cryolithology of the Lower Lena]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1989, 162 p. (in Russian).
- Malakhova V.V., Golubeva E.N. Assessment of permafrost stability on the Eastern Arctic shelf under extreme warming scenario in the XXI century. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 1, p. 61–72.
- Rekant P.V., Tumskoy V.E., Gusev E.A. et al. Distribution and peculiarities of subaquatic cryolithozone occurrence in the area of Semenovskaya and Vasilievskaya Bars (Laptev Sea) according to seismoacoustic profiling. In: *Sistema morja Laptevyyh i priliegajushhih morej Arktiki: sovremennoe sostojanie i istorija razvitiya* [The Laptev Sea and Adjacent Arctic Seas System: Current State and Development History]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2009, p. 332–348.
- Romanovskii N.N., Gavrilov A.V., Tumskoy V.E. et al. Thermokarst and its role in the formation of the near shore zone of the Laptev Sea shelf. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 3, p. 79–91.
- Romanovskii N.N., Tumskoy V.E. Retrospective approach to the estimation of the contemporary extension and structure of the shelf cryolithozone in East Arctic. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 1, p. 3–14.
- Slagoda E.A. *Kriolitogennye otlozheniya Primorskoj ravniny morya Laptevyykh: litologiya i mikromorfologiya (poluostrov Bykovskiy i ostrov Muostakh)* [Cryolitogenic Sediments of the Laptev Sea Coastal Lowland: Lithology and Micromorphology (Bykovsky Peninsula and Mu-ostakh Island)]. Tyumen, Ekspress, 2004, 119 p. (in Russian).
- Tumskoy V.E. Thermokarst and its role in the development of the Laptev Sea region in the Late Pleistocene and Holocene: Author's abstract, Moscow, 2002, 26 p. (in Russian).
- Tumskoy V.E., Romanovskii N.N., Tipenko G.S. Results of modeling of ice complex deposits thaw under thermokarst lakes in northeast Yakutia. In: *Proceedings of the Second Conference of Russian Geocryologists*. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2001a, vol. 2, p. 300–307 (in Russian).
- Tumskoy V.E., Romanovsky N.N., Tipenko G.S. Formation of taliks under thermokarst lakes in the north-east of Yakutia: modeling results. In: *Proceedings of the Second Conference of Russian Geocryologists*. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2001b, p. 293–300 (in Russian).
- Shakhova N.E., Nikolsky D.Y., Semiletov I.P. On the current state of the submarine permafrost on the East Siberian shelf: modeling results testing with field observation data. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2009, vol. 429, No. 4, p. 541–544.
- Angelopoulos M., Overduin P.P., Jenrich M. et al. Onshore thermokarst primes subsea permafrost degradation. *Geophys. Res. Lett.*, 2021, vol. 48 (20), e2021GL093881.
- Angelopoulos M., Overduin P.P., Westermann S. et al. Thermokarst lake to lagoon transitions in Eastern Siberia: Do submerged taliks refreeze? *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 2020, vol. 125, No. 10, p. 2019005424. DOI: 10.1029/2019JF005424.
- Angelopoulos M., Westermann S., Overduin P.P. et al. Heat and salt flow in subsea permafrost modeled with CryoGRID2. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 2019, vol. 124, p. 920–937.
- Arboleda-Zapata M., Angelopoulos M., Overduin P.P. et al. Exploring the capabilities of electrical resistivity tomography to study subsea permafrost. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16 (10), p. 4423–4445.
- Edwards R.N., Wolfgram P.A., Judge A.S. The ICE-MOSES experiment: mapping permafrost zones electrically beneath the Beaufort Sea. *Mar. Geophys. Res.*, 1988, vol. 9, No. 3, p. 265–290.
- Grosse G., Schirrmeyer L., Kunitsky V.V., Hubberten H.-W. The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: an illustration from the NE Siberian coast. *Permafrost. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, p. 163–172.
- Grosse G., Schirrmeyer L., Siegert Ch. et al. Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary. *Geomorphology*, 2007, vol. 86 (1/2), p. 25–51.
- Jenrich M., Angelopoulos M., Grosse G. et al. Thermokarst Lagoons: a core-based assessment of depositional characteristics and an estimate of carbon pools on the Bykovsky Peninsula. *Front. Earth Sci.*, 2021, vol. 9, p. 637899.
- Kotlyakov V., Khromova T. Land resources of Russia – maps of permafrost and ground ice. Boulder, Colorado USA: National snow and ice data center. 2002 [Electronic medium]. – <http://nsidc.org> (last visited: 20.09.2015).
- Overduin P.P., Westermann S., Yoshikawa K. et al. Geoelectric observations of the degradation of nearshore submarine permafrost at Barrow (Alaskan Beaufort Sea). *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 2012, vol. 117, No. 2, p. F02004. DOI: 10.1029/2011JF002088.
- Overduin P.P., Wetterich S., Günther F. et al. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *The Cryosphere*, 2016, vol. 10 (4), p. 1449.
- Romanovsky N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al. Thermokarst and Land-Ocean Interactions, Laptev Sea Region, Russia. *Permafrost. Periglac. Process.*, 2000, vol. 11, p. 137–152.
- Sellmann P.V., Delaney A.J., Arcone S.A. Coastal subsea permafrost and bedrock observations using dc resistivity. *Cold Reg. Res. and Eng. Lab. (CRREL)*, Hanover, NH, 1989, No. 89, p. 13.
- Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Commun.*, 2017, vol. 8, No. 1, p. 1–13.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, C08007.
- Strauss J., Boike J., Bolshiyakov D.Y. et al. Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2017. In: *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. Rep. on polar and marine res., 2018, vol. 725, p. 296.
- Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K. et al. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic Sea emissions. *Sci. Advances*, 2020, vol. 6, No. 5, p. eaay7934.
- Walker G.G., Kawasaki K., Osterkamp T.E. Transient electromagnetic detection of subsea permafrost near Prudhoe Bay, Alaska. *AAPG Bull.*, 1985, vol. 69, No. 4, p. 681.

*Поступила в редакцию 12 января 2023 г.,
после доработки – 2 июля 2023 г.,
принята к публикации 4 сентября 2023 г.*