

Нелли Фёдоровна ЧИСТЯКОВА<sup>1</sup>  
Ольга Игоревна ДАМАСКИНА<sup>2</sup>

УДК 551.345(571.12)

## ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД БОВАНЕНКОВСКОГО ПОДНЯТИЯ НА ЭТАПЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ БОВАНЕНКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

<sup>1</sup> доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии,  
Тюменский государственный университет  
geoeкологиya@mail.ru

<sup>2</sup> аспирант, Тюменский научный центр СО РАН  
damaskinaola@yandex.ru

### Аннотация

Оценены особенности современного состояния многолетнемерзлых пород (ММП) на этапе промышленного освоения Бованенковского месторождения, по данным анализа физических, химических и литолого-фациальных характеристик осадочных отложений. Современное состояние и литологический состав ММП Бованенковского поднятия, к которому приурочено Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение, залегающих в интервале абсолютных отметок +10... –330 м, характеризуется слоистостью и пространственной изменчивостью. Нестационарное температурное поле этих пород, формируемое природными и антропогенными факторами, характеризуется особенностями изменения глубины залегания и формы изотермы 0°C, залегающей между охлажденными и тальми породами, и изотермы –5°C, выделенной в кровле ММП на границе с сезонным слоем промерзания-протаивания. Глубина залегания и форма изотермы 0°C обусловлены воздействием природных факторов,

---

**Цитирование:** Чистякова Н. Ф. Особенности современного состояния многолетнемерзлых пород Бованенковского поднятия на этапе промышленного освоения Бованенковского месторождения / Н. Ф. Чистякова, О. И. Дамаскина // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 2. С. 52-66.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-52-66

---

а изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$  — совместным воздействием природных и антропогенных факторов. Установлено наличие двух зон фазовых переходов воды различной мощности: верхней — в зоне слоя сезонного промерзания-протаивания, нижней — на контакте яруса охлажденных и талых пород. С учетом особенностей современного состояния ММП (температуры, глубины залегания изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ , мощности ярусов мерзлых и охлажденных пород по разрезу поднятия) выделены измененные и неизмененные многолетнемерзлые породы.

#### **Ключевые слова**

Слой сезонного промерзания-протаивания, фазовые переходы воды, мерзлотно-геотермический профиль, углеводородные газы, современное состояние многолетнемерзлых пород, мощность ярусов мерзлых и охлажденных пород, измененные и неизмененные многолетнемерзлые породы.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-52-66**

#### **Введение**

Промышленное освоение недр полуострова Ямал, набирающее масштабы в XXI в., связано с нефтегазопромысловым обустройством территории арктической тундры, особенностью которой являются многолетнемерзлые породы. В условиях чередования трансгрессивно-регрессивных ритмов Полярного бассейна и циклических изменений сурового арктического климата, начиная со среднего плейстоцена, продолжаясь в суровых условиях позднего плейстоцена и голоцена на многих территориях планеты, в том числе на территории северных районов Западно-Сибирской плиты, сформировалась мощная толща многолетнемерзлых пород, существующая до настоящего времени [1, 16]. На полуострове Ямал открыто 11 газовых и 15 нефтегазоконденсатных месторождений. Состав газовых залежей метановый, нефтегазоконденсатных — с высоким содержанием гомологов метана. Из недр юрско-меловых отложений Бованенковского месторождения, приуроченного к одноименному локальному поднятию Нурминско-Александровского нефтегазоносного пояса, где выявлено 8 газовых, 5 газоконденсатных и 13 газоконденсатнонефтяных залежей, к 2020 г. планируется добыть 1 трлн  $\text{m}^3$  природного горючего газа. Актуальность работы обусловлена незащищенностью ММП поднятия в условиях техногенного воздействия на них на этапе промышленного освоения с целью добычи углеводородного сырья.

#### **Результаты**

Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение открыто в 1971 г. скважиной 51 Главтюменьгеологии и расположено в 470 км к северу от г. Салехарда, в зоне сплошного распространения ММП [1, 3, 7].

Подшова яруса ММП на месторождении находится в интервале температур  $-3^{\circ}\text{C}$ ...  $-2^{\circ}\text{C}$ ; подошва криогенной толщи определяется положением нулевой изотермы [1, 7]. Разрез осадочного чехла поднятия представлен мезозойско-

кайнозойскими отложениями. В отложениях кайнозоя бурением вскрыты толщи палеогена, плейстоцена, голоцена [2, 3]. Талые и охлажденные породы палеогена, залегающие с размывом на верхнемеловых отложениях березовской свиты, вскрытой в сводовой части поднятия на отметках  $-250... -270$  м, представлены темно-серыми до черных глинами, обогащенными рассеянным органическим веществом животного и растительного происхождения, с прослоями песчаников и содержанием органического углерода от десятых долей до 1,1%. По направлению к центру поднятия палеогеновые отложения выклиниваются и в сводовой части структуры отсутствуют. Березовская свита, в объеме коньякского, сантонского и кампанского ярусов верхнего мела, представлена чередованием прослоев песчаников и тонких прослоев тёмно-серых глин с содержанием  $\text{Corg}$  0,7-1,3%. Наиболее древние отложения, вскрытые в ярусе мерзлых пород, представлены переслаиванием супесей, песков, суглинков, глин, пылеватых частиц плейстоценового возраста в объеме свит: полуйская ( $\text{mgI}_1$ ), казымская ( $\text{mI}_2\text{-II}_1$ ), салехардская ( $\text{mgII}_{2-4}$ ), казанцевская ( $\text{m,pmIII}_1$ ) (рис. 2, 3).

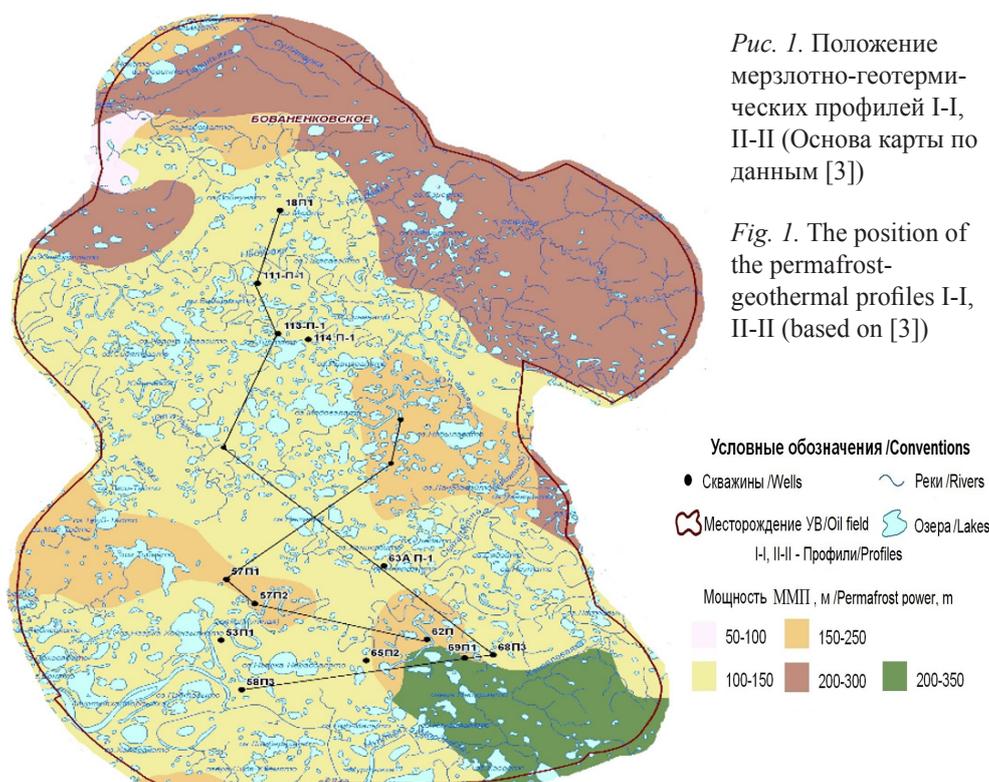


Рис. 1. Положение мерзлотно-геотермических профилей I-I, II-II (Основа карты по данным [3])

Fig. 1. The position of the permafrost-geothermal profiles I-I, II-II (based on [3])

Рельеф поднятия представляет собой террасированную аккумулятивную равнину с высотами до 55 м над уровнем моря, с речными поймами, III-ей морской, II-ой, I-ой лагунно-морскими террасами, озерами. Озерные отложения (I IV) представлены маломощной (1-5 м) толщиной аллювиальных осадков, обогащенных растительными остатками [2, 3].

Температурное поле ММП формируется в результате их теплового взаимодействия с внешней средой (атмосфера, космическое пространство и др.) и подстилающими слоями осадочных отложений. Современные температуры ММП поднятия изменяются в интервале 0... –6°C. В слое годовых колебаний температуры характерно ее заметное повышение на отдельных участках, зафиксированное с 1987 по 2008 гг. [1]. При среднегодовых отрицательных температурах воздуха толща грунтов и горных пород поднятия в интервале абсолютных отметок +10... –330 м в настоящее время находится в мерзлом состоянии. В летний период, когда температура поверхностных слоев литосферы становится положительной, и верхние слои осадочной толщи растепляются, формируется сезонный слой протаивания [4, 17]. В годовом цикле эта верхняя часть литосферы характеризуется наличием сезонного слоя промерзания-протаивания, в котором осуществляются фазовые переходы воды из твердого состояния в жидкое и обратно. Фазовый переход воды происходит в интервале перехода температур через 0°C и сопровождается выделением (при промерзании) или поглощением (при протаивании) тепловой энергии. В разрезе толщи отложений изучаемого интервала выделяются две зоны фазовых переходов: верхняя, на а.о. +10... –170 м, приуроченная к зоне сезонного промерзания-протаивания с температурами  $\pm 0,1... -5^\circ\text{C}$ , и нижняя — в интервале температур  $\pm 0,1... +1^\circ\text{C}$ , где в подошве криогенной толщи зафиксирована нулевая изотерма. Интенсивность развития температурных деформаций мерзлых пород существенно зависит от их дисперсности [1, 6, 10, 13, 15, 16]. На температуры осадочного чехла влияет также тепловая энергия, выделяемая в ходе преобразования органического вещества, захороненного в осадочных отложениях. Осадочные толщи раннего, среднего и позднего плейстоцена обогащены концентрированным (прослой намывного торфа, углистого детрита) и рассеянным органическим веществом с угнетенным спектром тундровых видов флоры и арктического комплекса фораминифер [3]. Содержание органического углерода в отложениях плейстоцена изменяется от сотых долей % (в супесях и песках) до 0,3-0,5% и более (в суглинках и глинах). Преобразование органического вещества начинается уже в придонной зоне субаквального палеобассейна в процессе седиментации осадков и органических веществ и продолжается под воздействием микроорганизмов в ходе дальнейшего погружения отложений на различных этапах диагенеза [9]. При анаэробном биохимическом преобразовании органического вещества образуются газообразные продукты различного состава, в т. ч. углеводородные газы, в основном, метан. Биохимическое преобразование остатков зоо-, фитопланктона и бентоса, захороненных в донных отложениях, в углеводородные и другие газы сопровождается выделением энергии, активизирующей деятельность микроорганизмов. Кроме сингенетичного метана, образованного на стадии диагенеза, содержащегося в верхних горизонтах кайнозойских отложений по литологическим окнам и трещинам из нижележащих толщ ганькинской и березовской свит верхнего мела, в эти отложения могут дополнительно поступать эпигенетичные углеводородные газы, а также метан из более глубоких горизонтов (зона апокатагенеза, глубины более 5 км) — по тектоническим нарушениям древнего рифта, проходящего в районе месторож-

дения. Из углеводородных газов, образующихся как на стадии диагенеза, так и мигрировавших снизу, растворенных в низкотемпературных придонных водах субаквального арктического бассейна, при определенных условиях (температура ниже 4-5°C) в кайнозойских отложениях образуются газогидраты, формирование и преобразование которых в природных условиях сопровождается выделением тепловой энергии [1, 8, 12, 13, 14]. В толще кайнозойских отложений Бованенковского и расположенного севернее Харасавэйского месторождений в процессе бурения параметрических и разведочных скважин были получены разнодебитные (от 50 м<sup>3</sup>/сут. до 1 000 и более м<sup>3</sup>/сут) притоки углеводородных газов [1, 3]. Природный углеводородный газ, полученный из морских отложений салехардской свиты, имеет состав CH<sub>4</sub> = 98,4-99,9%; N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> = 1,6-0,1%. Из отложений казанцевской, салехардской и казымской свит также были получены углеводородные газы метанового состава с дебитом 800-1 000 м<sup>3</sup>/сут и более; наименьшие дебиты (<50 м<sup>3</sup>/сут) — из отложений полуйской свиты.

С использованием опубликованных материалов [2, 3] по температурам авторами данной работы были построены мерзлотно-геотермические профили по линиям I-I и II-II (рис. 1). Мерзлотно-геотермический субмеридианальный профиль по линии I-I (рис. 2) был построен по скважинам 18-111-113-32-68-58.

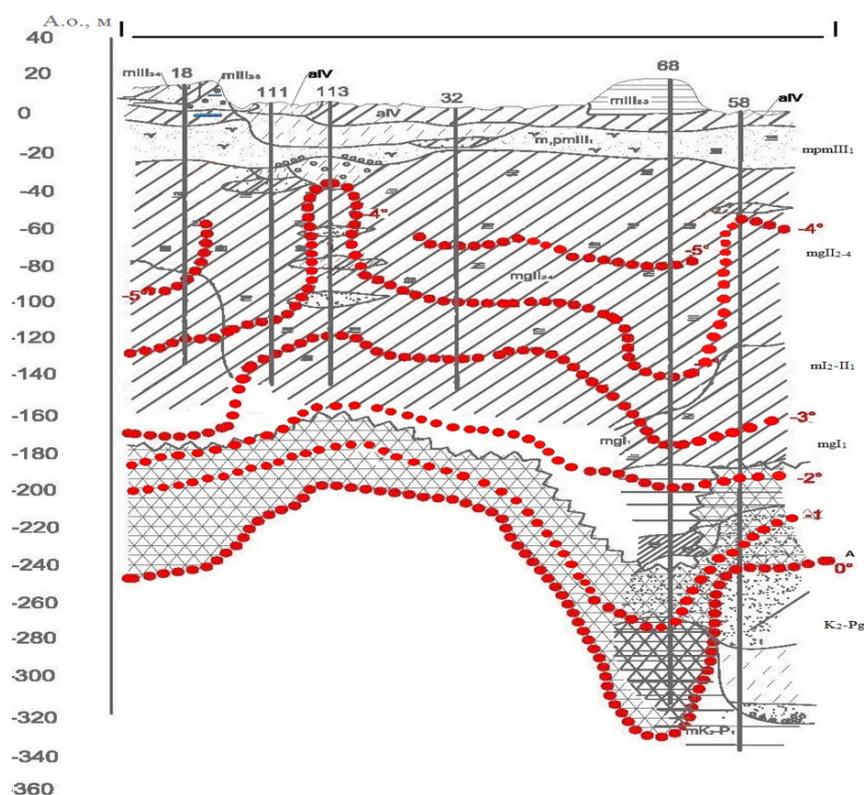


Рис. 2. Мерзлотно-геотермический профиль по линии I-I (геологическая основа — [3])

Fig. 2. The permafrost-geothermal profile along the line I-I (based on the geological data of [3])

Анализ профиля показывает, что в разрезе осадочного чехла на глубинах до –330 м фиксируются изотермы: 0 °С, –1°С, –2°С, –3°С, –4°С, –5°С. Изотерма –6°С отсутствует. Наиболее высокое (–199... –210 м) положение нулевой изотермы зафиксировано в скважинах 113 и 32, расположенных в сводовой части структуры, где, в связи с размывом толщи глин палеогеновых отложений в своде поднятия, талые породы представлены песчано-алевритовыми разностями верхнего мела.

Условные обозначения/ Conventions

<b>Голоцен/ Holocene</b>		<b>Средний плейстоцен/ Middle Pleistocene</b>
aIV	Аллювиальные отложения/ Alluvial deposits	mgII <sub>2-4</sub> Отложения салехардской свиты/ Layers of the Salekhard Formation
<b>Поздний плейстоцен/ Late Pleistocene</b>		<b>Средний-ранний плейстоцен/ Middle-Early Pleistocene</b>
mIII <sub>3-4</sub>	Отложения каргинско-сартанского горизонта/ Deposits of the Karginsky-Sartanian horizon	mI <sub>2</sub> -II <sub>1</sub> Отложения казымской свиты/ Deposits of the Kazymorskaya Formation
mIII <sub>2-3</sub>	Отложения зырянско-каргинского горизонта/ Deposits of the Zyryansko-Karginsky horizon	mgI <sub>1</sub> Отложения полуйской свиты/ Deposits of the Semiiskaya suite
mpmIII <sub>1</sub>	Отложения казанцевской свиты/ Deposits of the Kazan suite	<b>Мел-палеоген/ Mel-Paleogene</b> K <sub>2</sub> -Pg Палеоген-верхнемеловые отложения/ Paleogene-Upper Cretaceous deposits

Литологический состав отложений/ Lithological composition of sediments

	Суглинок/ clay loam		Гравий, галька/ Gravel, pebbles
	Глина/ clay		Суглинки с прослоями супесей/ loam with sandy loam
	Песок пылеватый/ Sand silty		Полигонально-жильный лед/ Polygonal vein ice
	Супесь/ Sandy loam		Пластовый лёд и льдогрунт/ Plast ice and ice layer
	Супеси с прослоями песков/ Sandy loam with sand interbeds		Границы стратиграфических горизонтов/ The boundaries of the stratigraphic horizons
	Алевриты/ Siltstones		
113	Номер скв., где замерена t °С/ Number of wells where t °С	A	Подшва криогенной толщи, нулевая изотерма/ zero isotherm
	Подшва мёрзлой толщи/ Outsole of the frozen sequence		Охлаждённые грунты/ Chilled ground

Окончание рис. 2

Fig. 2 (end)

Песчаники с более высокой теплопроводностью по сравнению с глинами прогреты сильнее, чем глины, подстилающие криогенную толщу на его крыльях, что влияет на повышение интервала залегания изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  в своде поднятия. Нулевая изотерма, установленная в скв. 68 (юго-восточный сегмент структурного поднятия), проходящая в подошве криогенной толщи, наиболее глубоко залегает на отметках  $-200\dots -330$  м.

Кроме влияния природных региональных факторов: теплового потока, формируемого в глубоких недрах Земли; температурного поля, сформированного в результате анаэробного преобразования захороненного органического вещества с генерацией углеводородных соединений различного фазового состояния и состава; образования и преобразования газогидратов углеводородных и неуглеводородных газов — на глубину залегания нулевой изотермы в разрезе поднятия влияют и природные локальные факторы: неоднородность литологического состава ММП, обуславливающая их различную теплопроводность. Среди локальных факторов, влияющих на температурное поле ММП — теплоперенос от газовой залежи, сформировавшейся в верхнемеловых отложениях сеномана [1]. Таким образом, совокупное воздействие вышеперечисленных природных региональных и локальных эндогенных источников тепла привело к повышению положения изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  в сводовой части поднятия на 100 м вверх по сравнению с краевыми частями поднятия.

Изотерма  $-5^{\circ}\text{C}$  распространена не повсеместно и имеет прерывистый характер. Отсутствие изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$  в отложениях, слагающих разрез скважин 111, 113 и 58, объясняется тем, что в геологическом разрезе данных скважин выделяются песчано-гравийные линзы флювиального происхождения — палеоруслы рек (рис. 2). Грунты песчано-гравийного состава, вскрытые в данных интервалах, характеризуются более высокими значениями коэффициента теплопроводности по сравнению с монолитно залегающими в толще разреза суглинисто-глинистыми породами, что приводит к более быстрому глубокому прогреву и растеплению существенно песчаных отложений на локальных участках слоя сезонного промерзания-протаивания и отражается на прерывистости изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$ . В зоне отсутствия изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$ , изотермы  $-4^{\circ}\text{C}$  и  $-3^{\circ}\text{C}$  занимают более высокие гипсометрические отметки по сравнению с теми скважинами, где изотерма  $-5^{\circ}\text{C}$  установлена (рис. 2). Вклад в изменение теплофизических характеристик пород висят также фазовые переходы, реализующиеся в области перехода температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  [4].

Мерзлотно-геотермический профиль П-П, построенный по скважинам 22-24-57'-57-62, также имеет субмеридианальное простираие и характеризует сводовую часть структуры (рис. 3). Глубина залегания и форма нулевой изотермы, проходящей в сводовой части поднятия, определяется современным воздействием природных региональных и локальных факторов, сформировавшихся в отложениях кайнозоя в настоящее время. Глубина залегания изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  расположена на а.о.  $-190\dots -202$  м и существенно отличается от ее глубины и формы, зафиксированных в профиле I-I. Изотерма  $-5^{\circ}\text{C}$  установлена в раз-

резе скважин 57 и 62, а в скв. 57', 22, 24 она отсутствует. Отсутствие ее в скв. 57' объясняется наличием в разрезе вмещающих глинистых пород песчано-алевритовых линз.

Кроме природных процессов на состояние ММП месторождения значительное влияние оказывает антропогенная деятельность. Техногенное воздействие как результат инженерно-хозяйственной деятельности человека характеризуется повышенной интенсивностью нагрузок на отдельные участки поднятия, находящегося в промышленном освоении. При часто повторяющихся и динамических нагрузках на мерзлые грунты и горные породы в ослабленных зонах фазовых переходов слоя промерзания-протаивания будут усиливаться деструктивные изменения структуры ММП. По данным дешифрирования космоснимков, скважина 22 расположена вблизи вертолетной площадки, а скважина 24 находится вблизи автозимника. На этих участках уничтожен растительный покров и верхний почвенный слой, что делает нижезалегающие грунты более чувствительными по отношению к внешним динамическим нагрузкам и температурным колебаниям. Под воздействием техногенных нагрузок прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов непрерывно изменяются. Воздействие акустических волн на ММП уменьшает сопротивление разрушению мерзлого грунта, растущее с увеличением длительности воздействия этой нагрузки. Наибольшей изменчивостью и величиной сжимаемости отличаются глины. Коэффициент сжимаемости глин 0,023, песков — 0,010; коэффициент оттаивания глин равен 0,228, песков — 0,028 [4, 5]. При вибрации (вертолетная площадка) и систематическом силовом воздействии большегрузных автомобилей (автозимники) грунтовые системы уплотняются, что приводит к увеличению коэффициента теплопроводности грунтов. В результате этого дополнительно уплотненные осадочные отложения на отдельных участках быстрее и глубже прогреваются и мерзлые породы сильнее протаивают по сравнению с соседними участками, где техногенное воздействие отсутствует [11].

Вопросы влияния техногенных процессов на температурный режим ММП полуострова Ямал, изменение их состояния и свойств освещены в работах [3, 7] и др. Наличие или отсутствие изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$  определяется влиянием как внешних природных региональных условий (глобальное потепление климата), локальных — литолого-фациальный состав отложений, так и антропогенным воздействием на локальном уровне. Последнее по сравнению с природными факторами оказывает более существенное влияние на масштабы и интенсивность растепления ММП в связи с более энергоемким техногенным воздействием на осадочные отложения.

Выявленные в работе особенности пространственно-временного распределения изотерм  $0^{\circ}\text{C}$  и  $-5^{\circ}\text{C}$  по площади и разрезу многолетнемерзлых пород поднятия позволяют выделить их следующие современные состояния: неизменные и измененные. Неизменные ММП установлены в скв. 18, 32, 68, 62, 57, вскрывших краевые части поднятия, с мощностью яруса мерзлых пород 100-150 м, охлажденных пород 45-90 м, среднегодовой температурой  $-1^{\circ}\text{C} \dots -5^{\circ}\text{C}$  и более глубоким залеганием нулевой изотермы на отметках  $-215 \dots -310$  м.

Измененные многолетнемерзлые породы установлены в скважинах 58, 111, 113, 57', 22, 24, расположенных в сводовой части поднятия, и характеризуются мощностью яруса мерзлых пород 160-170 м, яруса охлажденных пород 35-40 м, среднегодовой температурой  $-1^{\circ}\text{C}$ ...  $-4^{\circ}\text{C}$  и более высокими гипсометрическими отметками залегания нулевой изотермы — от  $-200$  м и выше.

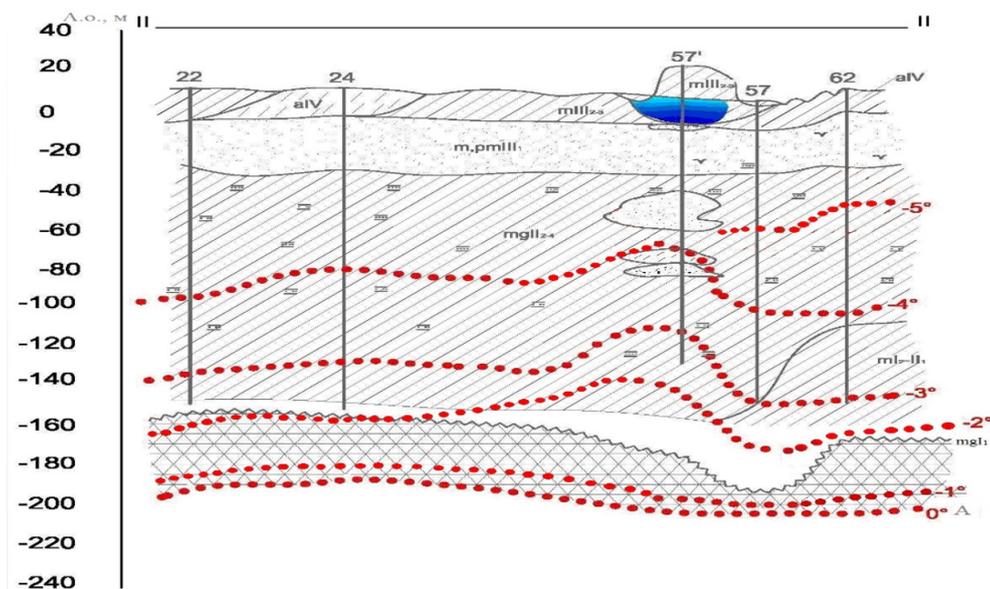


Рис. 3. Мерзлотно-геотермический профиль по линии II-II (геологическая основа [3]). Условные обозначения см. рис. 2

Fig. 3. The permafrost-geothermal profile along the line II-II (based on the geological data of [3]). See Fig. 2 for the designations

## Выводы

1. Современное состояние ММП, залегающих в интервале отметок  $+10$ ...  $-330$  м, слагающих отложения кайнозоя Бованенковского поднятия, сформировавшееся в результате совместного воздействия природных и антропогенных факторов, характеризуется нестационарным температурным полем с различной среднегодовой температурой, мощностями ярусов мерзлых и охлажденных пород, особенностями поведения изотерм  $0^{\circ}\text{C}$  и  $-5^{\circ}\text{C}$  в разрезе различных участков поднятия.

2. Отличительной особенностью этой толщи являются две зоны фазовых переходов воды различной мощности: верхняя — в зоне слоя сезонного промерзания-протаивания (температуры  $\pm 0,1$ ...  $-5^{\circ}\text{C}$ ), и нижняя — на контакте яруса охлажденных и талых пород (температуры  $\mp 0,1$ ...  $+1^{\circ}\text{C}$  и более). Среди природных факторов, влияющих на распределение температур в ММП, выделяются экзогенные, отражающие глобальное потепление климата (отсутствие изотермы  $-6^{\circ}\text{C}$  в изученных скважинах), и эндогенные региональные: тепловой

поток, поступающий из глубоких недр Земли; анаэробное преобразование органического вещества, захороненного в субаквальных отложениях, сопровождаемое генерацией углеводородов различного фазового состояния и химического состава; образование и преобразование газогидратов из углеводородных и неуглеводородных газов в зоне распространения ММП; эндогенные локальные: неоднородность литологического состава осадочных отложений, слагающих разрез поднятия с различной теплопроводностью, а также кондуктивный теплоперенос от залежи углеводородного газа, сформировавшейся в сеноманских отложениях данной территории. Среди антропогенных факторов, влияющих на ММП, — промышленное освоение территории, сопровождаемое энергетически-высоким техногенным воздействием на осадочные отложения поднятия.

3. Положение изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ , залегающей на границе охлажденные-талые породы, определяется воздействием природных факторов: региональных — глубинный тепловой поток, анаэробное преобразование рассеянного органического вещества пород, образование и преобразование газогидратов в толще ММП, и локальных — влияние сеноманской залежи углеводородных газов, неоднородность литологического состава ММП.

4. Положение изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$ , залегающей на границе кровли ММП и подошвы сезонного слоя промерзания-протаивания, обусловлено природными факторами — неоднородностью литологического состава пород (локальный фактор), климатическими условиями (региональный фактор) и активным антропогенным воздействием на локальном уровне, активизирующим (при частых перепадах температур) интенсивность фазовых переходов воды и связанной с ними деформации ММП и грунтов, граничащих со слоем сезонного промерзания-протаивания.

5. Особенности современного состояния и нестационарного температурного поля ММП поднятия, сформировавшиеся под воздействием внешних и внутренних региональных и локальных факторов природного и антропогенного происхождения, позволили выделить в их разрезе неизменные и измененные ММП. Неизменные ММП характеризуются среднегодовой температурой  $-1...-5^{\circ}\text{C}$ , глубиной залегания изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  ниже отметок  $-215$  м, мощностью яруса мерзлых пород  $100-150$  м, охлажденных пород  $45-90$  м и распространены на большей части поднятия. Эти показатели отражают естественную эволюцию ММП во времени, обусловленную влиянием природных экзогенных и эндогенных процессов, происходящих на данной территории.

Измененные ММП более прогреты (среднегодовая температура  $-1^{\circ}\text{C}...-4^{\circ}\text{C}$ ; глубина залегания изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  выше  $-210$  м; мощность яруса мерзлых пород  $160-170$  м, охлажденных  $-35-40$  м). Они установлены на локальных участках не только в нижней части яруса ММП, но и в их верхней части. Среди причин природного происхождения, приводящих к растеплению ММП сверху и изменяющих их температуру в разрезе, — неоднородность литологического состава осадочных отложений и глобальное потепление климата. Другой причиной, приводящей к метаморфизму ММП в настоящее время, является антропогенная деятельность, при которой мерзлые породы с поверхности больше прогреваются.

ся и глубже протаивают. Это подтверждается увеличением мощности яруса мерзлых и снижением мощности яруса охлажденных пород, отсутствием изотермы  $-5^{\circ}\text{C}$ , повышением а.о. глубин залегания изотерм  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-3^{\circ}\text{C}$  на 15-50 м вверх по сравнению с участками, где активное техногенное воздействие отсутствует.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баду Ю. Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала / Ю. Б. Баду // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 3. С. 11-22.
2. Баду Ю. Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири / Ю. Б. Баду // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 40-56.
3. Баду Ю. Б. Строение и состояние криогенной толщи // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал / Ю. Б. Баду, Е. Е. Подборный. Т. 2. Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение. М.: Газпром экспо, 2013. 424 с.
4. Вакулин А. А. Основы геокриологии / А. А. Вакулин. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2011. 220 с.
5. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
6. Гречищев С. Е. Кинетика фазовых переходов, температурные деформации и пучение мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 1997. № 3. С. 30-34.
7. Карта геозоологического районирования Западно-Сибирской равнины / гл. ред. В. Т. Трофимов, В. В. Баулин. М.: Главтюменьгеология; МГУ; ПНИИС, 1984.
8. Макогон Ю. Ф. Возможности образования газогидратных залежей природных газов в придонной зоне морей и океанов / Ю. Ф. Макогон, А. А. Трофимук, В. П. Царев, Н. В. Черский // Геология и геофизика. 1973. № 4. С. 3-5.
9. Успенский В. А. Введение в геохимию нефти / В. А. Успенский. Л.: Недра, 1970. 309 с.
10. Физические свойства минералов и горных пород: справочник / под ред. М. П. Воларовича. М.: Недра, 1998. 255 с.
11. Шуваев А. Н. Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях / А. Н. Шуваев, М. В. Панова // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Вып. 4 (63). Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. С. 14-20.
12. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне / В. С. Якушев. М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2010. 38 с.
13. Hennings J. In Situ Thermal Conductivity of Gaz-Hydrate-Bearing Sediments of the Mallik 51-38 Well / J. Hennings, E. Huenges, H. Burkhardt // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. No B11206. Pp. 1-11.
14. Johnson A. Experimental Investigation of Gas-Water Relative Permeability for Gas-Hydrate — Bearing Sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope / A. Johnson, S. Patil, A. Dandekar // Mar. and Petrol. Geol. 2011. Vol. 28. Pp. 419-426. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.10.013

15. Nixon J. E. Thermal simulation of subsea saline permafrost / J. E. Nixon // *Can. J. Earth Sci.* 1986. Vol. 23. Pp. 2039-2046. DOI: 10.1139/e86-188
16. Streletskaya I. D. Pleistocene — Holocene Paleoenvironmental Records from Permafrost Sequences at the Kara Sea Coasts (NW Siberia, Russia) / I. D. Streletskaya, E. A. Gusev, A. A. Vasiliev, G. E. Oblogov, A. N. Molodkov // *Geography, environment, sustainability.* 2013. Vol. 6. No 3. Pp. 60-76. DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-60-76
17. Woo M. K. Progress in Permafrost Hydrology in the New Millenium / M. K. Woo, D. I. Kane, S. K. Carey, D. Yang // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2008. Vol. 19. No 2. Pp. 237-254. DOI: 10.1002/ppp.613

Nelly F. CHISTYAKOVA<sup>1</sup>

Olga I. DAMASKINA<sup>2</sup>

UDC 551.345(571.12)

### **THE FEATURES OF THE CURRENT STATE OF PERMAFROST ROCKS OF THE BOVANENKOVO UPLIFT AT THE STAGE OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF THE BOVANENKOVO GAS FIELD**

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor,  
Department of Geoecology, University of Tyumen  
geoekologiya@mail.ru

<sup>2</sup> Postgraduate Student, Tyumen Scientific Center  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
damaskinaola@yandex.ru

#### **Abstract**

This article assesses the features of the current state of permafrost in the west of the industrial development of the Bovanenkovo field according to the analysis of the physical, chemical, and lithologic-facies characteristics of the Cenozoic deposits. The current state and lithological composition of permafrost rocks of the Bovanenkovo uplift (to which the Bovanenkovo oil and gas field is confined in the absolute range between +10 and –330 m) is characterized by stratification and spatial variability. The non-stationary temperature field of this permafrost rocks (which depends on natural and anthropogenic factors) is characterized by changes in the depth and forms of the 0 °C isotherm lying in the lower part of permafrost between cooled and thawed rocks and an isotherm of –5 °C, isolated in the roof of frozen rocks at the boundary with a seasonal layer of freezing-thawing. Changes in the depth and shape of the 0 °C isotherm are influenced by natural factors; and the isotherm –5 °C is a complex effect of natural and anthropogenic factors. The presence of two zones of phase transitions of water of different capacities is established: the upper one — in the zone of the seasonal freezing-thawing layer, the lower one — at the contact of the layer of

---

**Citation:** Chistyakova N. F., Damaskina O. I. 2018. “The Features of the Current State of Permafrost Rocks of the Bovanenkovo Uplift at the Stage of Industrial Development of the Bovanenkovo Gas Field”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 2, pp. 52-66.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-52-66

---

cooled and thawed rocks. Taking into account the specific features of the current state of permafrost (temperature, depth, form of the 0 °C, –5 °C isotherms, and the capacity of the frozen and cooled rock layers along the Bovanenkovo uplift), the modified and unchanged permafrost rocks are distinguished.

**Keywords**

Layer of seasonal freezing-thawing, phase transitions of water, permafrost-geothermal, profile, hydrocarbon gases, the current state of permafrost, the thickness of frozen and cooled rocks, changed and unchanged permafrost.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-52-66**

**REFERENCES**

1. Badu Yu. B. 2014. "Vliyaniye gazonosnykh struktur na moshchnost' kriogennoy tolshchi Yamala" [Influence of Gas-Bearing Structures on the Thickness of the Cryogenic Thickness of the Yamal]. *Kriosfera Zemli*, vol. 18, no 3, pp. 11-22.
2. Badu Yu. B. 2011. "Geologicheskoye stroyeniye kriogennoy tolshchi severa Zapadnoy Sibiri" [Geological Structure of the Cryogenic Thickness of Western Siberia]. *Inzhenernaya geologiya*, no 1, pp. 40-56.
3. Badu Yu. B., Podborny E. E. 2013. "Stroyeniye i sostoyaniye kriogennoy tolshchi" [Structure and Condition of the Cryogenic Stratum]. In: *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal* [Cryosphere of Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula]. Vol. 2. Bovanenkovskoye neftegazokondensatnoye mestorozhdeniye [Bovanenkovo Oil and Gas Condensate Field]. Moscow: Gazprom Expo.
4. Vakulin A.A. 2011. *Osnovy geokriologii* [The Foundations of Geocryology]. Tyumen: University of Tyumen Publishing House.
5. Vyalov S. S. 1978. *Reologicheskiye osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological Foundations of Soil Mechanics]. Moscow: Higher School.
6. Grechishchev S. E. 1997. "Kinetika fazovykh perekhodov, temperaturnyye deformatsii i pucheniye merzlykh gruntov" [Kinetics of Phase Transitions, Temperature Deformations and Punching of Frozen Soils]. *Cryosphere of the Earth*, no 3, pp. 30-34.
7. Trofimov V. T., Baulin V. V. (eds.). 1984. *Karta geoekologicheskogo rayonirovaniya Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Map of Geoecological Zoning of the West Siberian Plain]. Moscow: Glavtumengeologiya; Moscow State University; PNIIS.
8. Makogon Yu. F., Trofimuk A. A., Tsarev V. P., Chersky N. V. 1973. "Vozmozhnosti obrazovaniya gazogidratnykh zalezhey prirodnykh gazov v pridonnoy zone morey i okeanov" [Possibilities for the Formation of Gas Hydrate Deposits of Natural Gases in the Near-Bottom Zone of the Seas and Oceans]. *Geologiya i fizika*, no 4, pp. 3-5.
9. Uspensky V. A. 1970. *Vvedeniye v geokhimiyu nefti* [Introduction to the Geochemistry of Oil]. Leningrad: Nedra.
10. Volarovich M. P. (ed.). 1998. *Fizicheskiye svoystva mineralov i gornyykh porod: spravochnik* [Physical Properties of Minerals and Rocks. Handbook]. Moscow: Nedra.
11. Shuvaev A. N., Panova M. V. 2013. "Nadezhnost' i dolgovechnost' avtomobil'nykh dorog v slozhnykh prirodnykh usloviyakh" [Reliability and Longevity of Highways in

- Difficult Natural Conditions]. In: Aktual'nyye voprosy proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog, vol. 4 (63), pp. 14-20. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University.
12. Yakushev V. S. 2010. Prirodnyy gaz i gazovyye gidraty v kriolitozone [Natural Gas and Gas Hydrates in the Cryolithozone]. Moscow: VNIIGAZ.
  13. Hennings J., Huenges E., Burkhardt H. 2005. "In situ Thermal Conductivity of Gaz-Hydrate-Bearing Sediments of the Mallik 51-38 Well". Journal of Geophysical Research, vol. 110, no B11206, pp. 1-11.
  14. Johnson A., Patil S., Dandekar A. 2011. "Experimental Investigation of Gas-Water Relative Permeability for Gas-Hydrate — Bearing Sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope". Marine and Petroleum Geology, vol. 28, pp. 419-426. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.10.013
  15. Nixon J. E. 1986. "Thermal Simulation of Subsea Saline Permafrost". Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 23, pp. 2039-2046. DOI: 10.1139/e86-188
  16. Streletskaya I. D., Gusev E. A., Vasiliev A. A., Oblogov G. E., Molodkov A. N. 2013. "Pleistocene — Holocene Paleoenvironmental Records from Permafrost Sequences at the Kara Sea Coasts (NW Siberia, Russia)". Geography, environment, sustainability, vol. 6, no 3, pp. 60-76. DOI: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-60-76
  17. Woo M. K., Kane D. I., Carey S. K., Yang D. 2008. "Progress in Permafrost Hydrology in the New Millenium". Permafrost and Periglacial Processes. vol. 19, no 2, pp. 237-254. DOI: 10.1002/ppp.613