

УДК 550.3

DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-34-45

Изучение криолитозоны геофизическими методами, выделение основных типов мерзлотного состояния горных пород

Л. В. Шишканова

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
shishkanovalv@tyuiu.ru*

Аннотация. Изучение криолитозоны на полуострове Ямал связано с газо- и гидратонасыщенными интервалами, предупреждением газовых выбросов, часто встречающихся при бурении скважин. Распространение многолетнемерзлых пород определяет поиск новых методик изучения геокриологической обстановки района, основные закономерности строения зоны по данным геолого-геофизических исследований, результатов бурения скважин и сейсмической разведки.

Изучение зоны многолетнемерзлых пород имеет огромное значение при бурении скважин для избежания различных видов осложнений. Кроме того, интерпретация данных геофизических исследований в комплексе с данными по бурению и сейсмическими материалами позволяет построить модель распространения зоны по латерали.

Проведение геофизических методов помогает в некоторой степени предупредить, а также предотвратить возможные аварийные ситуации. Рассмотрен достаточно большой фонд геофизического материала, проанализирован комплекс исследований в зоне многолетнемерзлых пород полуострова Ямал на многих месторождениях.

В результате проведенных исследований представлены основные методики интерпретации материалов геофизических исследований, выделены критерии оценки основных типов мерзлотного состояния горных пород.

Ключевые слова: месторождения полуострова Ямал, криолитозона (многолетнемерзлые породы), комплекс геофизических исследований скважин, мерзлотное состояние горных пород

Для цитирования: Шишканова, Л. В. Изучение криолитозоны геофизическими методами, выделение основных типов мерзлотного состояния горных пород / Л. В. Шишканова. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-5-34-45 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 5. – С. 34–45.

Investigation of the permafrost zone by geophysical techniques and determination of primary categorisations of permafrost conditions in rocks

Ludmila V. Shishkanova

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
shishkanovalv@tyuiu.ru*

Abstract. The investigation of the permafrost zone situated in the Yamal Peninsula pertains to gas- and hydrate-saturated intervals. The avoidance of gas discharge frequently met during well drilling is of utmost importance. The allocation of permafrost rocks governs the quest for novel approaches to analyze the geocryological situation of the locale, together with ascertaining the principal regularities of the zone structure, ascertained via geological and geophysical investigations, analysis of well drilling data, and seismic assessments.

The investigation of the permafrost zone plays a crucial role in well drilling to prevent various types of complications. Moreover, the interpretation of geophysical survey data in combination with drilling and seismic data allows us to construct a model of the zone's lateral spread.

Carrying out geophysical methods helps to prevent, to some extent, and also prevent possible emergency situations. A fairly large fund of geophysical material has been reviewed, and a complex of studies in the permafrost zone of the Yamal Peninsula in many fields has been analyzed.

Following these studies, this article presents the primary geophysical survey material interpretation techniques with highlighted criteria for identifying different permafrost conditions in rocks.

Keywords: fields of the Yamal Peninsula, permafrost zone (permafrost rocks), well logging, permafrost state of rocks

For citation: Shishkanova, L. V. (2023). Investigation of the permafrost zone by geophysical techniques and determination of primary categorisations of permafrost conditions in rocks. *Oil and Gas Studies*, (5), pp. 34-45. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-34-45

Введение

Освоение полуострова Ямал, проблемы его геолого-геофизического изучения непосредственно связаны с зоной многолетнемерзлых пород (ММП). Многолетнемерзлые породы повсеместно распространены на рассматриваемой территории, образование которых связано с обледенением четвертичных отложений.

Региональное распространение толщи пород в криолитозоне (с севера на юг полуострова Ямал) обусловлено влиянием большого количества геологических и природных факторов. В связи с этим температура, толщина (мощность) зоны сезонного протаивания и промерзания отличаются на разных месторождениях (площадях) полуострова. Использование геолого-геофизических данных в пробуренных скважинах для изучения зоны ММП дает возможность более детально определить мерзлотное состояние горных пород по данным геофизических исследований для построения детальной модели распространения криолитозоны.

Наличие рассматриваемой зоны обуславливает специфику методики геолого-геофизических исследований при бурении скважин.

Изучение распространения многолетнемерзлой зоны позволяет определить основные закономерности ее строения, распространения и глубину вскрытия по площади. В рамках проведенных исследований выполнен анализ материалов геофизических исследований скважин (ГИС) в четвертичных отложениях (в криолитозоне) в скважинах ряда месторождений рассматриваемого района. Комплекс промыслово-геофизических исследований проведен в ограниченном объеме. Результаты выполненных исследований представлены в разделе «Объекты и методы исследования».

Объекты и методы исследования

Бурение скважин на полуострове Ямал требует качественного подхода при вскрытии криолитозоны. Известны многочисленные осложнения при бурении скважин в зонах многолетнемерзлых пород.

Так, например, образование каверн с коэффициентом кавернозности $K > 1,5$ в интервалах твердомерзлых пород может привести к обвалам пород, вскрытых бурением, что влечет за собой прихват бурильного инструмента. Кроме того:

- наблюдаются выбросы бурового раствора, газа и воды;
- нарушение технического состояния скважины, а именно: недоподъем цементного раствора при цементации кондуктора и направления, при обратном промерзании смятие обсадных колонн и нарушение герметичности замков муфтовых соединений;
- при сезонном протаивании возможное проникновение бурового раствора в затрубное пространство и т. д. [1].

Известно, что на севере Западной Сибири неоднократно фиксировались газопроявления при бурении поисково-разведочных скважин, приуроченные к интервалам залегания четвертичных отложений. Поэтому изучение газо- и гидратонасыщенных интервалов в криолитозоне связано с предупреждением и ликвидацией газовых выбросов.

Изучение криолитозоны геофизическими методами имеет огромное значение для предотвращения осложнений и аварийных ситуаций.

Для успешного решения поставленной задачи по теме: «Изучение криолитозоны геофизическими методами, выделение основных типов мерзлотного состояния горных пород» была рассмотрена и проанализирована промыслово-геофизическая информация в зоне ММП на примере скважин ряда месторождений. В таблице 1 представлен пример проведенных исследований по ряду скважин с отбивкой подошвы мерзлых пород по данным геофизических исследований.

Комплекс геофизических методов исследования скважин предназначен для решения большого объема геолого-геофизических задач. Однако в рассматриваемых породах он ограничен метрологическими особенностями аппаратуры при бурении скважин большого диаметра и проведен для решения задачи отбивки подошвы зоны многолетнемерзлых пород.

Анализ комплекса геофизических методов в четвертичных отложениях, проведенный в скважинах месторождений полуострова Ямал, выполнен под спуск кондуктора в интервале глубин, в основном от устья до 400–500 м. Верхняя граница сезонного протаивания на таких месторождениях, как Бованенковское и Харасавэйское, составляет 0,2–1,5 м, максимальные толщины не превышают 400 м.

Промыслово-геофизические исследования проведены в усеченном объеме в виде стандартного каротажа (3 зонда, ПС), кавернометрии, радиоактивного каротажа (ГК, НК), реже термометрии. Указанные методы не решают в полном объеме задачи изучения зоны ММП, а только ее часть.

Выполненный комплекс геофизических исследований скважин

Название площади	Номер скв.	Дата каротажа	Стандартный каротаж + ПС	Подошва ММП по данным ГИС
Арктическая	1	18.07.1968	35–375	267
Арктическая	28	18.04.1991	65–990	260
Бованенковская	53	05.06.1973	10–494	198
Бованенковская	115	25.02.1984	25–290	200
Восточно-Харасавэйская	400	25.04.1985	18–262	317
Восточно-Харасавэйская	401	22.03.1986	35–480	316
Каменномысская	2	17.12.1975	10–490	248
Каменномысская	20	21.01.1988	12–346	253
Малоямальская	3002	26.04.1991	24–700	217
Малоямальская	3003	18.03.1991	0–334	180
Мантойская	50	16.07.–18.07.1999	100–650	280
Мантойская	51	Нет даты	92–353	240
Новопортовская	56	02.12.1966	16–352	238
Новопортовская	152	15.05.1984	16–335	240
Нулмуяхинская	63	Нет даты	0–2 870	286
Нулмуяхинская	65	29.04.1987	0–1 200	282
Среднеямальская	13	05.02.–27.02.1990	0–996	222
Хамбательская	54	03.03.1988	30–350	224
Хамбательская	56	04.10.1987	35–1 200	222
Ярудейская	3	13.06.1984	70–788	264

В рассматриваемых скважинах геофизические исследования проведены в объеме:

1. *Стандартный каротаж (3 зонда, ПС)*: проведен градиент зондами А2.0М0.5N, N0.5M2.0A, потенциал зондом N6.0M0.5A, ПС. Представленный комплекс стандартного каротажа в криолитозоне решает следующие задачи, а именно:

- регистрацию кажущегося сопротивления зондами и естественную поляризацию (ПС);
- наблюдение изменений значений кажущихся сопротивлений в зависимости от литотипа породы (пески, глины, алевролиты) в криолитозоне;
- изменение кажущихся сопротивлений более 100 Ом·м, изменение удельного электрического сопротивления в глинах наблюдается в пределах 3–5 Ом·м («связанная» вода в глинах и в песчано-алевролитовых породах находится в незамерзшем состоянии);
- подтверждением этого служит наличие отрицательной аномалии собственной поляризации против песчаных прослоев (скв. 401 Восточно-Харасавэйская, 41 Геофизическая, 35 Западно-Тамбейская, 63 Нулмуяхинская).

2. *Кавернометрия (профилеметрия)*: диаметр долота (номинальный диаметр скважины) в рассматриваемых отложениях равен 324 мм. При исследовании методом кавернометрии фактическое изменение диаметра скважины наблюдалось от 120 мм, что соответствует диаметру прибора в «сальниковых» образованиях до 600 мм и выше в кавернах.

3. *Радиоактивный каротаж (ГК, НК)*:

- в рассматриваемых скважинах радиоактивный каротаж (ГК, НК) проведен после спуска колонны, что привело к снижению показаний в двухколонной конструкции (непосредственно колонна и кондуктор);

- в зоне многолетнемерзлых пород глинистые породы характеризуются повышенными показаниями гамма-активности (метод ГК), песчаные разности — пониженными показаниями;

- расчленение пород по водородосодержанию (метод НГК, НКТ) позволяет выделить ледяные линзы (состоящие на 100 % из воды) и уплотненные породы с пониженной пористостью [2, 3].

4. *Термометрия*:

- замеры термометрии в зоне многолетнемерзлых пород проведены в ограниченном объеме, хотя термометрия является прямым методом для анализа изменения температурных процессов в скважинах;

- наблюдение за изменением температуры в период сезонного протаивания и промерзания до глубины 0–10 м изменяется в различной степени, далее, в разрезе скважин с увеличением глубины отмечается постепенное повышение до 0 °С, где в дальнейшем наблюдается постоянное увеличение температуры различной интенсивности [4].

5. *Отбор керна*: отбор керна и геолого-технологические исследования в рассматриваемых скважинах не проводились; в связи с этим вопрос выделения газо- и гидратонасыщенных интервалов в криолитозоне не рассматривался.

При изучении ММП полуострова Ямал геофизическими методами рассмотрены пробуренные скважины на ряде месторождений. Пример выполненного комплекса с выделением подошвы многолетнемерзлых пород представлен в таблице 1. Рассмотрены скважины Арктического, Бованенковского, Новопортовского, Харасавэйского, Каменномысского, Малыгинского и ряда других месторождений. Проведен анализ изменения геофизических характеристик в различных литотипах пород.

В результате проведенных исследований проведена попытка расчленить зону многолетнемерзлых пород в скважинах полуострова Ямал по ее физическим и механическим свойствам на породы с содержанием льда более 50 % (твердомерзлые, сильнольдистые), породы с содержанием льда 25–50 % (льдистые, с содержанием незамерзшей воды), породы с содержанием льда менее 25 % (слабильдистые, с большим содержанием глинистого материала).

Породы с содержанием льда более 50 % (твердомерзлые, сильнольдистые). По данным проведенного стандартного каротажа (3 зонда и ПС), данные породы характеризуются высокими значениями кажущихся сопротивлений ($KC > 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) [5]. Такое значение сопротивлений по зондам стандартного каротажа указывает на то, что породы сцементированы поровым льдом (имеют температуру достаточно низкую, при которой

большая часть содержащейся в них воды замерзла). На кавернометрии отмечается наличие каверны большого диаметра за счет «выкрашивания» при бурении порового льда.

Породы с содержанием льда 25–50 % (льDISTые, с содержанием незамерзшей воды) характеризуются наличием в порах незамерзшей воды до 50 %. По данным стандартного каротажа наблюдается изменение кажущихся сопротивлений от 10 до 70 Ом·м.

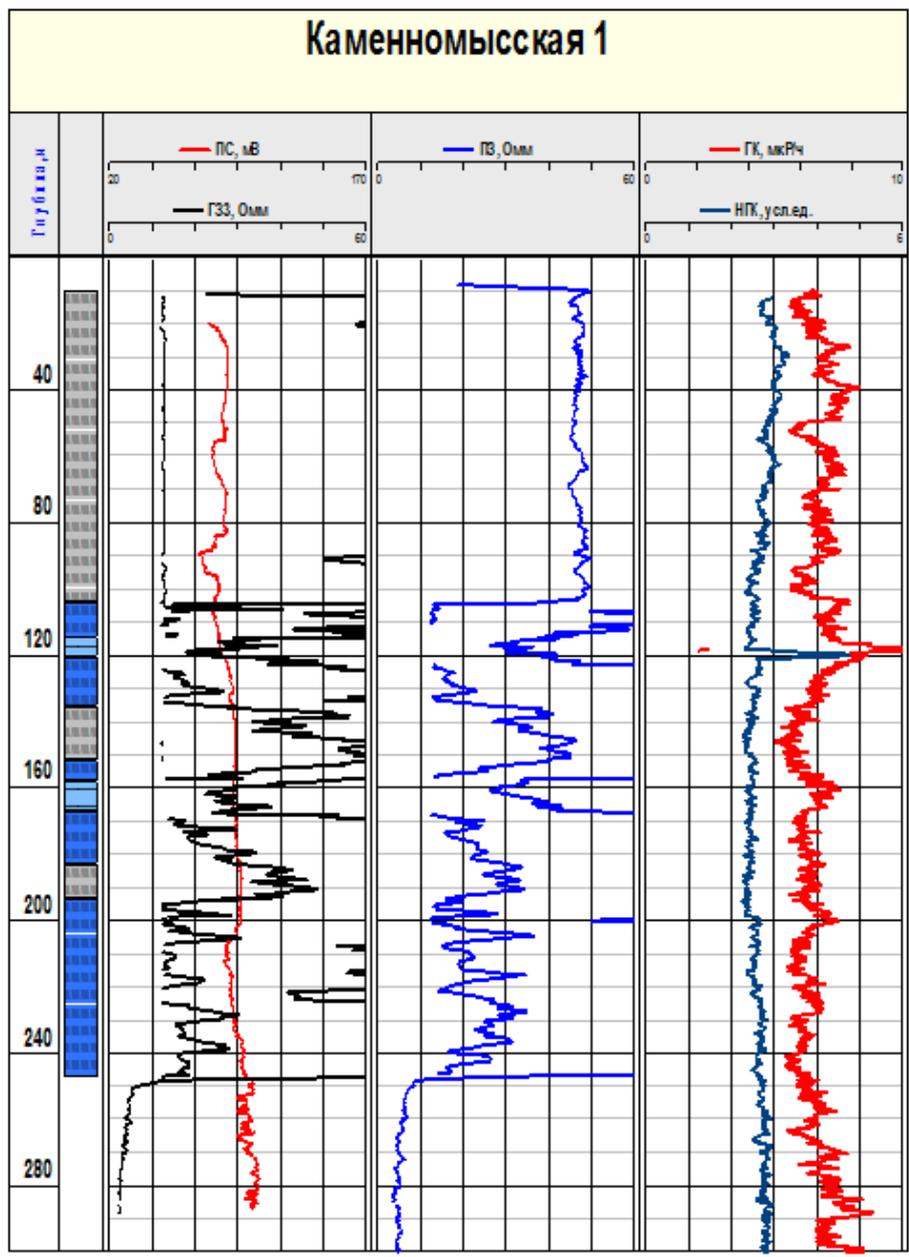
Слабодистые породы (с содержанием льда менее 25 %) в разрезе пробуренных скважин представлены глинистыми породами. Изменение кажущегося сопротивления колеблется в пределах 3–6 Ом·м. Отмечаются повышенные показания естественной радиоактивности (ГК), что указывает на незамерзшее состояние воды, «связанной» в глинах. В таблице 2 представлены данные по интерпретации материалов геофизических исследований в скважинах (рис. 1–3).

Таблица 2

Интерпретация материалов геофизических исследований

Название площади	Номер скв.	Дата каротажа	Ст. каротажа + ПС	Подолва ММП	Сильнольдистые породы (льда > 50 %) (интервал)	ЛьDISTые породы (льда 25–50 %) (интервал)	Слабодистые породы (льда < 25 %); с большим содержанием глинистого материала) (интервал)
Восточно-Харасавэйская	401	22.03.1986	35–480	300	34,5–45,8 134,1–165,6	45,8–106,3 165,6–190,5 209,8–228,3 274,3–281,2 285,4–300	106,3–134,1 190,5–209,8 228,3–274,3 281,2–285,4
Каменноыская	1	26.06.1969	11–289	248	9,8–104 135,5–152,1 183,1–193,9	104–114,6 120,4–135,5 152,1–158 167,2–183,1 193,9–247,7	114,6–120,4 158–167,2
Новопортовская	155	13.04.1984	28–370	212	25,4–91,5	91,5–148,1 159,8–178,3	148,1–159,8 178,3–212

На рисунках 1–3 приведены примеры интерпретации скважин на различных месторождениях.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Сильнольдистые
- Льдистые
- Слабольшдистые

Рис. 1. Результаты интерпретации геофизических исследований скважины 1 Каменномысской площади

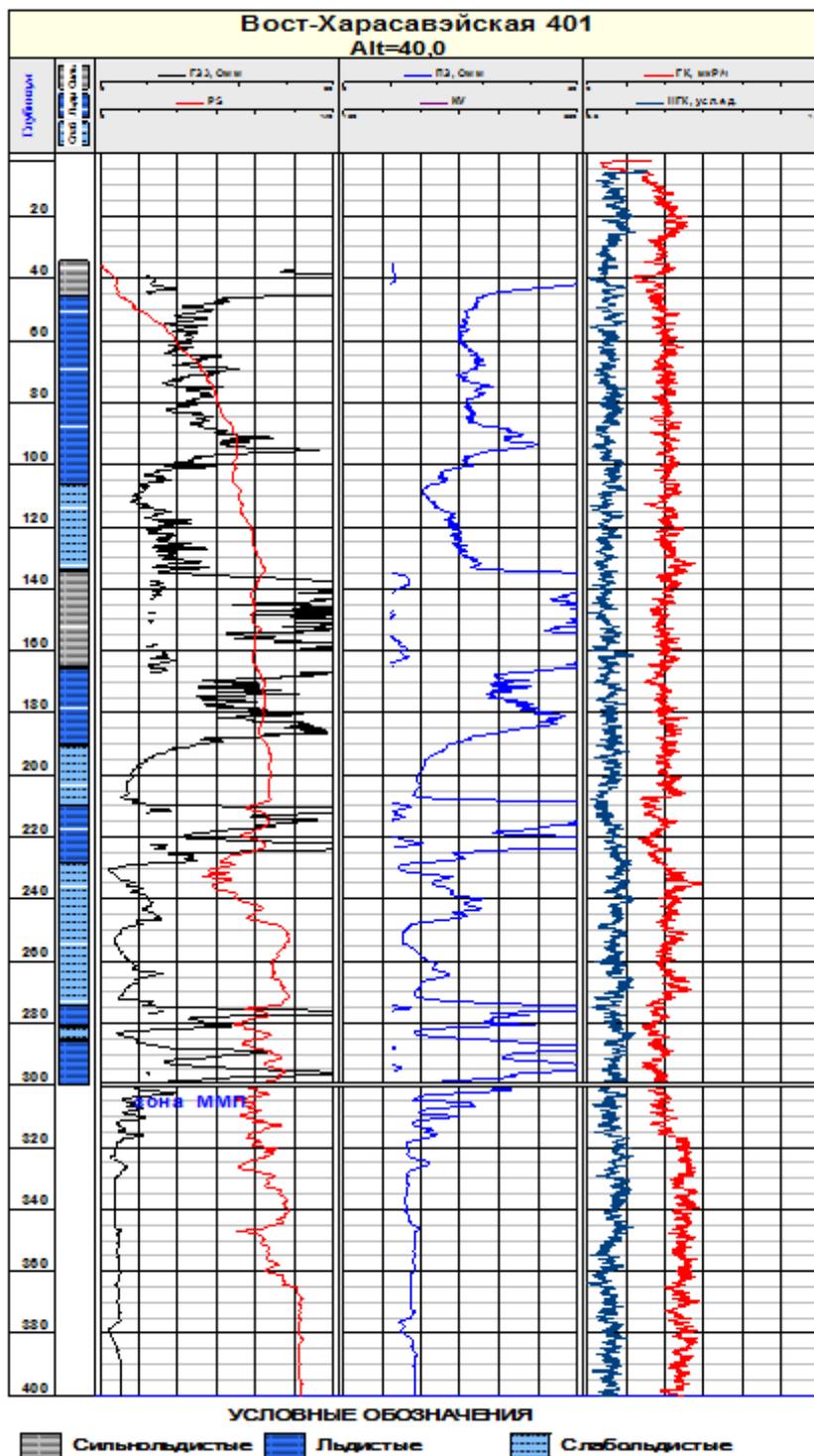


Рис. 2. Результаты интерпретации геофизических исследований скважины 401 Восточно-Харасавэйской площади

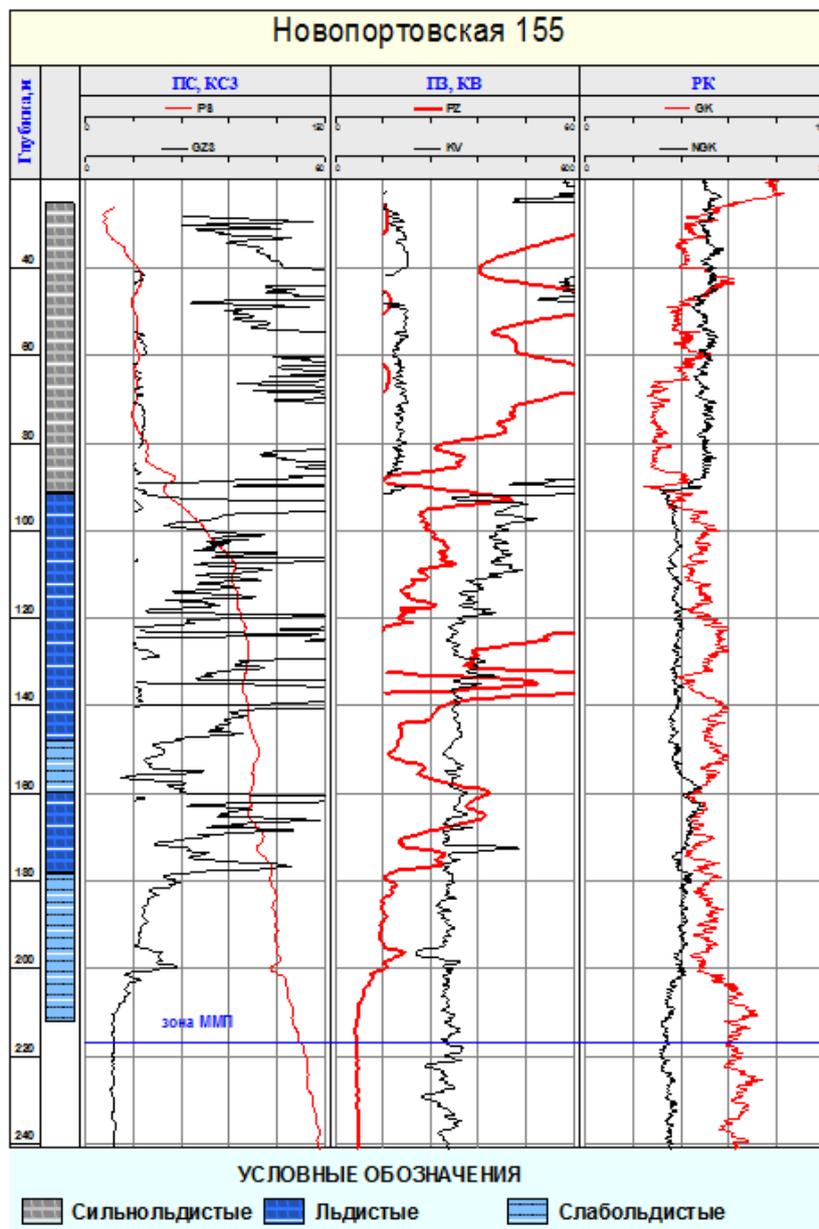


Рис. 3. Результаты интерпретации геофизических исследований скважины 155 Новопортовского месторождения

Результаты

Влияние геокриологической обстановки полуострова Ямал на технологические процессы при бурении скважин способствует необходимости глубокого изучения закономерностей строения и распространения мерзлых пород. В связи с этим изучение льдистости по данным геофизических исследований необходимо для учета определенных сложностей при строи-

тельстве и бурении скважин, для отслеживания опасных интервалов в рассматриваемой зоне, так как оценка льдистости в зоне от подошвы мерзлых пород до устья скважины является важным показателем, который характеризует физическое состояние пород при изменении температуры с глубиной.

Кроме того, фактором осложнений при бурении является газонасыщенность пород в зоне многолетнемерзлого разреза. Изучение газо- и гидратонасыщенных интервалов в криолитозоне связано с предупреждением и ликвидацией газовых выбросов, часто встречающихся при бурении данных интервалов. Известно, что на севере Западной Сибири неоднократно фиксировались газопроявления при бурении поисково-разведочных скважин, приуроченные к интервалам залегания четвертичных отложений. Результаты исследований представлены в таблице 3 на примере ряда скважин полуострова Ямал.

Процентное соотношение льдистости определялось в зоне мерзлых пород. Выполненный анализ на примере скважин полуострова Ямал показал, что в разрезе преобладают льдистые породы с содержанием льда 25–50 % (с содержанием незамерзшей воды).

На рисунках 1–3 показан пример расчленения пород по степени их льдистости. В скважине 1 Каменномысской площади газоопасный интервал отмечается в сильнольдистых породах в интервале 0–100 метров (см. рис. 1), в скважине 155 Новопортовского месторождения в интервале 0–90 метров (см. рис. 3).

Таблица 3

Изменение льдистости в скважинах многолетнемерзлого разреза

Месторождение	Кол-во скв.	Сильнольдистые породы (льда > 50 %), % содер.	Льдистые породы (льда 25–50 %), % содер.	Слабольшедистые породы (льда < 25 %, с большим содержанием глинистого материала), % содер.
Арктическое	3	23,8	47,1	29,1
Бованенковское	6	29,3	46,8	23,9
Восточно-Харасавэйское	3	17,4	44,7	37,9
Западно-Тамбейское	4	28,0	45,2	26,8
Каменномысское	3	38,1	35,4	26,5
Малоямальское	2	29,2	44,9	25,9
Мальгинское	5	21,7	55,5	22,8
Новопортовское	8	33,0	41,9	25,1
Северо-Тамбейское	4	29,6	45,1	25,3
Среднеямальское	3	46,3	34,6	19,1
Хамбате́йское	8	35,2	39,1	25,7
Харасавэйское	6	30,6	40,7	28,7

Расчленение разреза по льдистости дает возможность оценить степень опасности, связанной с геокриологическим строением разреза скважин полуострова Ямал. При этом повышенная газоопасность при бурении скважин связана с сильнольдистыми породами, которые выделяются в верхней части разреза.

Выводы

1. Комплекс промыслово-геофизических исследований в скважинах, вскрывших многолетнемерзлые породы, проведен в ограниченном объеме.
2. При интерпретации геофизических материалов определены интервалы различных механических и физических свойств, выявлена подошва ММП.
3. Указанные методы решают только часть общей задачи изучения многолетнемерзлых пород.
4. Проведена попытка расчленить зону ММП в скважинах полуострова Ямал по ее физическим и механическим свойствам на твердомерзлые (сильнольдистые породы, с содержанием льда более 50 %), породы с содержанием льда 25–50 % (льдистые породы, с содержанием незамерзшей воды), породы с содержанием льда менее 25 % (слабольдистые, с большим содержанием глинистого материала).
5. Представлена методическая основа выделения основных типов мерзлотного состояния.

Список источников

1. Коваленко, В. Е. Геофизические работы в скважинах : учебник / В. Е. Коваленко. – Москва : Недра, 1992. – 223 с. – Текст : непосредственный.
2. Сковородников, И. Г. Геофизические исследования скважин : курс лекций / И. Г. Сковородников. – Екатеринбург : УГГГА, 2003. – 294 с. – Текст : непосредственный.
3. Дахнов, В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин : учебник / В. Н. Дахнов. – 2-е изд., перераб. – Москва : Недра, 1982. – 448 с. – Текст : непосредственный.
4. Геофизические исследования скважин : учебник для вузов / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Р. А. Резванов, А. Н. Африкян. – Москва : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 400 с. – Текст : непосредственный.
5. Дьяконов, Д. И. Общий курс геофизических исследований скважин : учебник / Д. И. Дьяконов, Е. И. Леонтьев, Г. С. Кузнецов. – 2-е изд., перераб. – Москва : Недра, 1984. – 432 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kovalenko, V. E. (1992). Geofizicheskie raboty v skvazhinakh. Moscow, Nedra Publ., 223 p. (In Russian).
2. Skovorodnikov, I. G. (2003). Geofizicheskie issledovaniya skvazhin. Ekaterinburg, Ural'skaya gorno-geologicheskaya akademiya Publ., 294 p. (In Russian).

3. Dakhnov, V. N. (1982). Interpretatsiya rezul'tatov geofizicheskikh issledovaniy razrezov skvazhin. Moscow, Nedra Publ., 448 p. (In Russian).

4. Dobrynin, V. M., Vendel'shteyn, B. Yu., Rezvanov, R. A., & Afrikyan, A. N. (2004). Geofizicheskie issledovaniya skvazhin. Moscow, Gubkin University Publ., 400 p. (In Russian).

5. D'yakonov, D. I., Leont'ev, E. I., & Kuznetsov, G. S. (1984). Obshchiy kurs geofizicheskikh issledovaniy skvazhin. Moscow, Nedra Publ., 432 p.

Информация об авторе / Information about the author

Шишканова Людмила Викторовна, старший преподаватель кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, *shishkanovalv@tyuiu.ru*

Ludmila V. Shishkanova, Senior Lecturer at the Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen, *shishkanovalv@tyuiu.ru*

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 14.09.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 14.09.2023; accepted for publication 18.09.2023.