

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.326.2(268.52)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

О.Я. СОЧНЕВ¹, К.А. КОРНИШИН¹, Я.О. ЕФИМОВ², Е.У. МИРОНОВ^{3*}, В.С. ПОРУБАЕВ³

¹ — ПАО «НК «Роснефть», г. Москва, Россия

² — ООО «Арктический научный центр», г. Москва, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*mir@aari.ru

INTERANNUAL VARIABILITY OF THE ICE-FREE PERIOD DURATION IN THE SOUTHWESTERN KARA SEA

O.Ya. SOCHNEV¹, K.A. KORNISHIN¹, Ya.O. YEFIMOV², Ye.U. MIRONOV^{3*}, V.S.PORUBAYEV³

¹ — PAO "OC "Rosneft", Moscow, Russia

² — ООО "Arctic Research Center", Moscow, Russia

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*mir@aari.ru

Received June, 13, 2019

Accepted July, 30, 2019

Keywords: dates of ice clearance and ice formation, ice-free period, interannual variability, the Kara Sea

Summary

In the coming years, exploration drilling in the geological structures in the Kara Sea is planned. It will be carried out during the ice-free period using floating drilling facilities of a different ice class. The aim of the work is analysis of the interannual variability of duration of the ice-free period in the area of the geological structures the results of which are necessary for planning operational activity of the drilling platforms and optimization of expenses for exploration drilling on the Arctic shelf. For an assessment of interannual variability of the ice-free period duration in the area of the geological structures there were used data on the dates of water area clearance from ice and beginning of ice

Citation: Sochnev O.Ya., Kornishin K.A., Yefimov Ya.O., Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Interannual variability of the ice-free period duration in the southwestern Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 3: 239–254. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254.

formation in the southwestern part of the Kara Sea for the period of 30 years on the basis of the AARI weekly ice charts. An analysis of interannual variability of the ice-free period duration showed that a 20-year summer (1989–2008) and a 10-year (2009–2018) intervals could be identified. It is shown that in the last decade as a result of combination of favorable hydrometeorological conditions the ice-free period duration has increased by more than 1 month. An analysis of the main hydrometeorological factors determining the ice-free period duration indicated that it is possible to perform an assessment of duration of exploration drilling operations in the water area of the East-Prinovozemelsky license blocks with a period in advance of several months. Drilling with the use of ice-resistant drilling platform allows us to extend the operation period, as drilling could be started after disappearance of close ice and finished after the ice thickness growth up to 30 cm.

Поступила 13 июня 2019 г.

Принята к печати 30 июля 2019 г.

Ключевые слова: безледный период, даты очищения и ледообразования, Карское море, межгодовая изменчивость.

Рассмотрена межгодовая изменчивость сроков очищения акватории ото льда, начала ледообразования и продолжительность безледного периода в районе геологических структур в юго-западной части Карского моря. Показано, что в последнее десятилетие в результате сочетания благоприятных гидрометеорологических условий продолжительность безледного периода увеличилась более чем на месяц. Анализ основных гидрометеорологических факторов, определяющих продолжительность безледного периода, показал, что возможно выполнять оценку продолжительности операционного периода поисково-разведочного бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков с заблаговременностью в несколько месяцев.

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Приновоземельские лицензионные участки расположены в акватории юго-западной части Карского моря. Географически они ограничены архипелагом Новая Земля с запада, полуостровом Ямал с юга и полуостровом Таймыр с востока. Северо-восточная граница акватории проходит по условной линии, соединяющей мыс Желания и о. Диксон [1, 2]. В акватории лицензионных участков выявлены несколько перспективных на углеводороды структур, местоположение которых показано на рис. 1, а также открыто месторождение «Победа» в районе геологической структуры «Университетская».

В ближайшие годы на геологических структурах в Карском море планируется проведение поисково-разведочного бурения, которое ведется в безледный период с использованием плавучих буровых установок (ПБУ) различного ледового класса. В юго-западной части Карского моря продолжительность безледного периода составляет в среднем два-три месяца, и имеет значительную межгодовую изменчивость [2, 3]. Предварительная оценка возможной продолжительности безледного периода позволит осуществлять планирование операционной деятельности буровых платформ (начало мобилизации, количество скважин, комплекс гидродинамических исследований и т.д.) и, таким образом, оптимизировать затраты на поисково-разведочное бурение на арктическом шельфе.

Продолжительность безледного периода зависит от сроков очищения акватории ото льда и начала ледообразования. Сроки наступления ледовых фаз зависят от особенностей ледового режима в локальных районах Карского моря, которые определяются проявлениями гидрологических и метеорологических факторов, стоком рек, рельефом дна и очертанием берегов. В юго-западной части Карского моря выделены

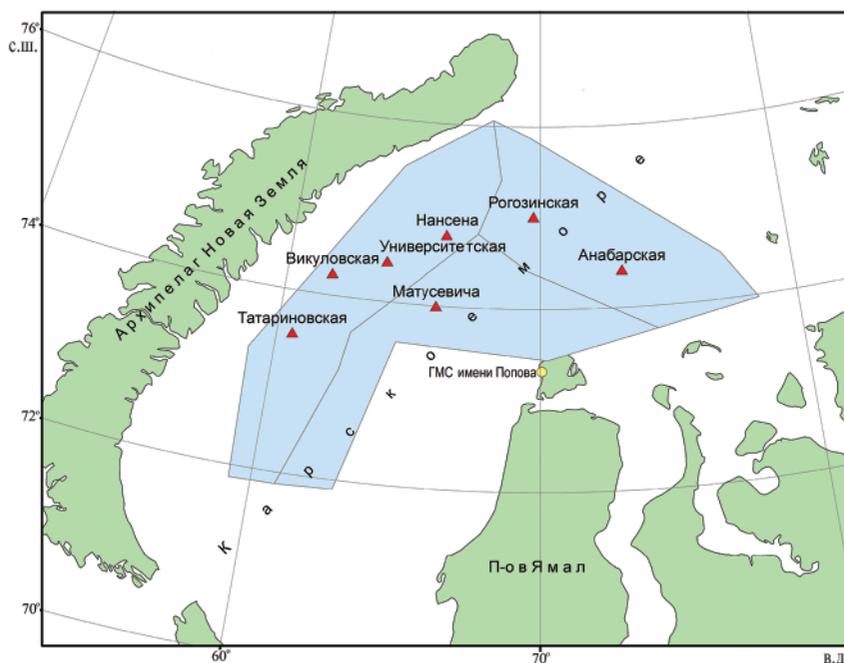


Рис. 1. Расположение геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря

Fig. 1. Location of the geological structures of the East-Prinovozemelsky license areas in the southwestern part of the Kara Sea

четыре локальных района, которые имеют однородные ледовые условия, к ним относятся: Ямало-Югорский, Обь-Енисейский, Новоземельский южный и северный районы [2, 4]. Сплоченные льды Новоземельского ледяного массива вытравивают обычно последними. Шесть геологических структур находятся в Новоземельском северном и южном районах, Анабарская структура — в Обь-Енисейском районе (см. рис. 1). На ледовый режим Обь-Енисейского района сильное влияние оказывает сток рек Обь и Енисей, что проявляется в более раннем начале таяния льдов и очищения акватории, а также в более раннем замерзании распресненных вод. Таким образом, необходимо детальное рассмотрение процессов очищения ото льда и замерзания для каждой геологической структуры.

Целью работы является анализ межгодовой изменчивости сроков очищения акватории ото льда, начала ледообразования и безледного периода для оценки продолжительности операционного периода поисково-разведочного бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Формирование цифровых массивов ледового картирования для акватории российских арктических морей выполняется на регулярной основе Мировым центром данных по морскому льду (МЦД МЛ) ААНИИ. Ледовая карта является информационным продуктом для комплексного отображения в пространстве характеристик ледяного покрова, она создается на основе экспертного анализа данных наблюдений

и дистанционного зондирования ледяного покрова в соответствии с международными и национальными стандартами ледового картирования. Для анализа данных были использованы ледовые карты ААНИИ с дискретностью одна неделя, построенные на основе спутниковой информации за период с 1989 по 2018 г. (<http://wdc.aari.ru/datasets/>). Использовался 30-летний период, который рекомендуется ВМО для анализа климатических данных. С 1997 г. для хранения и отображения ледовых карт применяется формат SEAGRID-3, который позволяет использовать геопривязанные данные по распределению льда для анализа и их визуализации. В летний период (июнь–сентябрь) карты представлены в виде распределения сплоченности льда, а в зимний период (октябрь–май) в виде распределения льдов разной возрастной градации (толщины).

Для анализа термических условий использовались ежесуточные данные измерений температуры воздуха на гидрометеорологических станциях (ГМС) им. Попова (о. Белый) и о. Диксон из архивов Госфонда (<http://meteo.ru>), как наиболее репрезентативных для акватории юго-западной части Карского моря. На основе этих данных были рассчитаны суммы градусо-дней мороза.

В работе использован критерий дата достижения льдом толщины 30 см в новый сезон замерзания. Толщина льда была рассчитана в каждой точке от фактического момента появления льда на основе эмпирического выражения, связывающего толщину льда с температурой воздуха, которое исходит из теоретической формулы Стефана, показавшего, что толщина льда пропорциональна квадратному корню из суммы градусо-дней мороза. Расчетные данные сопоставлялись с фактическими ледовыми картами распределения возраста льда.

Построение регрессионных зависимостей, оценка коэффициентов корреляции (на 5 % уровне значимости), коэффициентов детерминации и подбор вида аппроксимации временных рядов выполнялся на основе стандартных программ.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРОКОВ ОЧИЩЕНИЯ ОТО ЛЬДА И НАЧАЛА ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА АКВАТОРИИ ВОСТОЧНО-ПРИНОВОЗЕМЕЛЬСКИХ ЛИЦЕНЗИОННЫХ УЧАСТКОВ

Очищение акватории ото льда обычно начинается в первой половине июня, а заканчивается, в зависимости от интенсивности таяния, в течение июля или августа. В работе [2] показано, что межгодовые сроки очищения моря настолько велики, что, когда при экстремально легких ледовых условиях очищение заканчивается, при экстремально тяжелых условиях оно только начинается. Тем не менее продолжительность очищения моря ото льда составляет около шести декад, как при экстремально легких, так и при экстремально тяжелых ледовых условиях.

В качестве критерия очищения использовалась дата исчезновения льда на акватории всех семи геологических структур. Анализ данных за 30 лет показал, что выделяются два периода во временной изменчивости сроков очищения ото льда акватории, где расположены геологические структуры. При построении рис. 2 использованы средние даты очищения и начала замерзания для всех геологических структур. Как видно из рис. 2, граница раздела между периодами находится в интервале от 2007 до 2010 г. В качестве окончания первого периода и начала второго были выбраны 2008 и 2009 гг. соответственно. Выделены 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) периоды. За последнее десятилетие произошло существенное смещение сроков очищения акватории ото льда на более поздние даты.

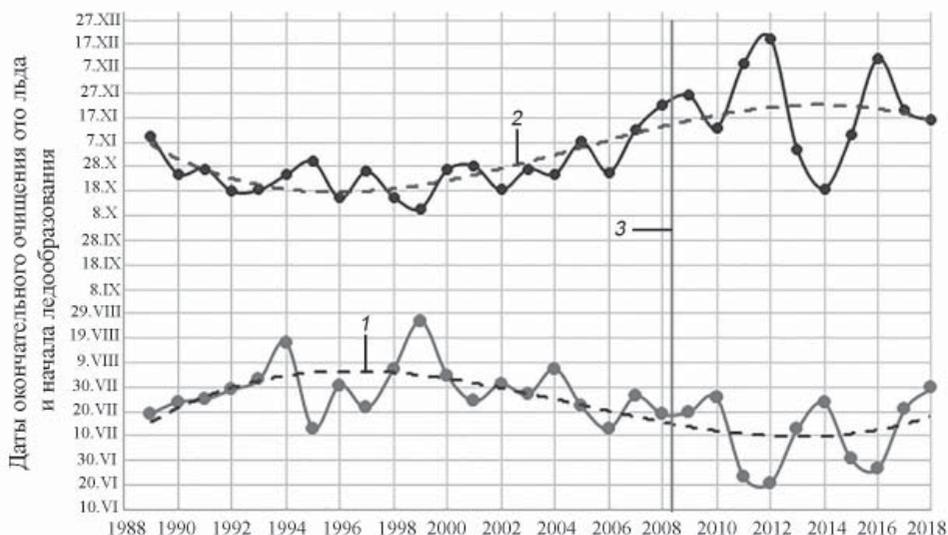


Рис. 2. Межгодовая изменчивость дат очищения акватории ото льда и начала ледообразования на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков.

1 — линия тренда дат окончательного очищения, 2 — линия тренда дат начала замерзания, 3 — линия разграничения межгодовых изменений на два периода

Fig. 2. Interannual variability of the dates of water area clearance from ice and beginning of ice formation in the geological structures of the East Prizevozemelsky license blocks.

1 — the trend line of the dates of final clearance, 2 — trend line of the dates of the beginning of freezing, 3 — line of delimitation of interannual changes into two periods

Межгодовая изменчивость дат очищения ото льда и начала замерзания аппроксимированы функциями полинома третьей степени (линии тренда). Анализ рис. 2 показывает, что сами графики и линии тренда близки к зеркальному отражению друг друга. Это свидетельствует о том, что изменения в ледовых фазах происходят с синхронной составляющей, обусловленной единой причиной. Совместный анализ межгодового хода температур воздуха, дат очищения ото льда и начала замерзания показал, что основным фактором, определяющим сроки очищения акватории ото льда и начала замерзания в районе большинства геологических структур, является степень суровости предшествующего холодного сезона, количественно выражаемая суммой градусо-дней мороза периода отрицательных температур.

В табл. 1 приведены статистические характеристики сроков окончательного очищения акватории ото льда на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и смещение дат очищения за два рассмотренных периода: 20 и 10 лет.

В период с 1989 по 2008 г. средние даты очищения ото льда приходились на конец июля – начало августа. Лишь на структуре Анабарская средняя дата очищения была относительно ранней (13 июля). Размах в датах очищения ото льда в эти годы изменялся в пределах 55–92 дня, при этом среднеквадратическое отклонение (СКО) было значительно меньше, составляя 13–21 день. За последнее десятилетие (2009–2018 гг.) средние даты очищения отмечались в первой половине июля. Раз-

**Средние и экстремальные даты окончательного очищения акватории ото льда
за периоды 20 (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.)
в районе геологических структур юго-западной части Карского моря**

Структуры	Даты очищения ото льда за период 20 лет (1989–2008 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Даты очищения ото льда за период 10 лет (2009–2018 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Смещение дат таяния за периоды 20 и 10 лет, дни		
	ранняя	средняя	поздняя			ранняя	средняя	поздняя			ранних	средних	поздних
Рогозинская	12.07.01	29.07	05.09.94	14	55	23.06.15	17.07	03.08.18	16	41	19	13	33
Нансена	08.07.01	31.07	06.09.99	14	60	19.06.12	15.07	13.08.17	17	55	19	16	24
Университетская	28.06.95	31.07	23.08.94	14	56	15.06.12	12.07	10.08.17	18	56	13	18	13
Викуловская	28.06.95	05.08	28.09.99	20	92	11.06.11	12.07	13.08.10	21	63	17	25	46
Татариновская	21.06.95	02.08	06.09.99	21	77	04.06.11	09.07	10.08.10	22	67	17	24	27
Матусевича	22.06.05	25.07	02.09.94	17	72	12.06.12	10.07	04.08.17	17	53	10	14	29
Анабарская	08.06.05	13.07	03.08.99	13	56	01.06.15	03.07	25.07.13	20	54	7	10	9

мах составил 41–67 дней, а СКО 16–21 день. На структуре Анабарская за последнее десятилетие средняя дата очищения ото льда, так же, как и в предыдущий период, является самой ранней по сравнению с датами на остальных структурах и приходится на 3 июля.

В последнее десятилетие произошло смещение сроков очищения в сторону более ранних дат. Смещение средних дат, в зависимости от структуры, изменялось от 10 до 25 дней, причем наименьшее смещение имело место на структуре Анабарская и составило 10 дней.

Анализ данных многолетней изменчивости сроков ледообразования за 30 лет (см. рис. 2) показал, что также имеются существенные отличия начала сроков замерзания за период 20 лет (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.). За последнее десятилетие произошло значительное смещение сроков ледообразования на более поздние даты, и оно составило от 15 до 30 суток в зависимости от структуры. В табл. 2 приведены общие статистические характеристики сроков ледообразования на геологических структурах Восточно-Приновоземельских лицензионных участков за два рассмотренных периода 20 и 10 лет.

В период 1989–2008 гг. средние даты начала ледообразования отмечались во второй половине октября. Исключение составила дата на структуре Татариновская, где средняя дата начала ледообразования отмечалась позже и приходилась на 7 ноября. Размах между поздними и ранними датами начала ледообразования в этот период составлял 37–54 дня.

Средние даты ледообразования за последнее десятилетие (2009–2018 гг.) сместились на ноябрь, а на структуре Татариновская на 2 декабря. Размах между поздними и ранними датами в этот период увеличился до 38–74 дней. Среднеквадратическое отклонение сроков ледообразования изменялось от 14 до 26 дней в зависимости от расположения геологических структур.

Средние и экстремальные даты начала ледообразования за периоды 20 (1989–2008 гг.) и 10 лет (2009–2018 гг.) в районе геологических структур юго-западной части Карского моря

Структуры	Даты ледообразования за период 20 лет (1989–2008 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Даты ледообразования за период 10 лет (2009–2018 гг.)			СКО, дни	Размах, дни	Смещение дат ледообразования за периоды 10 и 20 лет, дни		
	ранняя	средняя	поздняя			ранняя	средняя	поздняя			ранних	средних	поздних
Рогозинская	05.10.96	21.10	22.11.08	13	48	16.10.14	16.11	29.12.11	26	74	11	26	37
Нансена	04.10.99	23.10	22.11.08	12	49	15.10.14	17.11	22.12.12	22	68	11	26	30
Университетская	07.10.96	27.10	24.11.08	13	48	22.10.14	23.11	24.12.12	21	63	15	27	30
Викуловская	12.10.92	30.10	29.11.08	14	48	22.10.14	29.11	30.12.11	24	69	10	30	31
Татариновская	17.10.98	07.11	07.12.05	14	51	23.10.14	02.12	31.12.11	23	69	6	25	24
Матусевича	06.10.96	30.10	29.11.08	16	54	18.10.14	23.11	28.12.12	24	71	12	23	29
Анабарская	02.10.98	18.10	08.11.08	10	37	15.10.14	02.11	22.11.12	14	38	13	15	14

Для сроков замерзания юго-западной части Карского моря характерна большая пространственная неоднородность, продолжительность распространения замерзания по акватории составляет более одного месяца. Раннее замерзание происходит в северных районах моря, а также в Обь-Енисейском районе, где происходит распреснение моря за счет притока речных вод. Сравнительно позднее замерзание характерно для юго-западной части акватории, что обусловлено затоком теплых вод из Баренцева моря через пролив Карские Ворота.

Анализ изменчивости дат очищения ото льда и начала ледообразования на акваториях геологических структур Восточно-Приноземельских лицензионных участков, при учете степени связи сроков очищения и ледообразования с суммой градусо-дней мороза, позволяет разделить геологические структуры на две группы. Геологические структуры Анабарская, Матусевича и Рогозинская следует отнести к Обь-Енисейскому району, остальные четыре структуры к Новоземельскому району.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СРОКИ ОЧИЩЕНИЯ АКВАТОРИИ ОТО ЛЬДА И ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Основные природные факторы, определяющие сроки начала таяния и замерзания в арктических морях, описаны в работе [5]. После устойчивого перехода теплового бюджета верхней снежно-ледяной поверхности к положительным значениям начинается процесс таяния льдов. По мере увеличения поступления солнечной радиации и распространения снежниц нарастает интенсивность таяния. Летние воздушные переносы из Арктического бассейна приносят холодные воздушные массы, что существенно уменьшает интенсивность таяния. Воздушные массы из Северной Атлантики и со стороны прогретого материка, напротив, способствуют очищению моря [2].

В связи с неоднородностью возрастного состава (толщины) ледяного покрова сначала вытаивает более тонкий лед позднего зимнего образования, а затем лед

осеннего образования. Основным фактором, определяющим сроки очищения акватории ото льда, является площадь и толщина ледяного покрова, образовавшегося за весь предшествующий холодный сезон. Процесс таяния на акватории будет осуществляться тем дольше, чем больше толщина льда, и большую площадь будет занимать однолетний толстый лед.

Косвенную оценку максимальной толщины льда можно выполнять по сумме градусо-дней мороза за предшествующий холодный сезон. Выполненные расчеты показывают, что связь сроков очищения с суммой градусо-дней мороза для некоторых геологических структур характеризуются коэффициентом корреляции более 0,8.

Анализ архивных данных дает основание полагать, что прогнозирование будет эффективным для случаев ранних и поздних сроков очищения ото льда. Это позволит уточнить метод ледового прогноза ААНИИ по Карскому морю, утвержденный Центральной методической комиссией Росгидромета [6] (как по заблаговременности, так и по точности для отдельных геологических структур). Средние сроки очищения акватории ото льда характеризуются достаточно большим диапазоном изменения значений суммы градусо-дней мороза, что снижает возможность точной оценки ожидаемого срока окончательного таяния и требует учета других факторов, влияющих на процессы очищения ото льда. В этом случае процесс таяния во многом зависит от даты перехода температуры воздуха к положительным значениям и повторяемости адвекции теплых воздушных масс. Косвенно эти процессы характеризуют среднемесячные значения температуры воздуха в летний период. Учет таких факторов предпочтительно производить на основе метода локально-генетической типизации ледовых условий [4].

Значимыми гидрометеорологическими факторами, определяющими большую межгодовую изменчивость сроков ледообразования в юго-западной части Карского моря, являются теплосодержание моря, приток теплых вод, переносы воздушных масс с различной температурой и влажностью [2].

Для района семи геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков теплозапас воды является основным фактором, влияющим на сроки замерзания. Накопление теплозапаса водных масс происходит в течение безледного периода, который определяется сроками очищения ото льда. Чем раньше произойдет таяние ледяного покрова, тем больше окажется период времени для формирования теплозапаса. Как указано выше, сроки очищения ото льда зависят от суммы градусо-дней мороза за предшествующий холодный период. Зависимость дат начала замерзания от суммы градусо-дней мороза за предшествующий холодный период для рассматриваемых структур также высокая и в среднем характеризуется коэффициентом корреляции 0,82. Таким образом, сроки очищения акватории ото льда и начала ледообразования во многом определяются одним и тем же фактором — суровостью предшествующего холодного сезона, который оценивается по сумме градусо-дней мороза.

Корреляционная связь сроков очищения и ледообразования с суммой градусо-дней мороза хорошо выражена в районах геологических структур Нансена, Университетская, Рагозинская, Викуловская и Татариновская. В районе структур Матусевича и Анабарская связь менее четкая. Эти структуры расположены в районе Ямальского и Обь-Енисейского течений, которые могут оказывать существенное влияние на сроки очищения и ледообразования.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА

Промежуток времени от даты очищения акватории до начала замерзания составляет продолжительность безледного периода. На рис. 3 показана изменчивость продолжительности безледного периода в районе геологических структур юго-западной части Карского моря за последние 30 лет. Изменчивость характеризуется короткопериодными произвольными флуктуациями, которые обусловлены влиянием различных факторов и долгопериодной цикличностью, обусловленной климатическими изменениями за периоды более 10 лет [7]. Под цикличностью в данном случае понимается повторяющееся возвращение продолжительности безледного периода к исходному значению. В монографии [8] выполнен анализ спектральной плотности колебаний многолетних значений площади льда и показано, что в западных арктических морях значительную роль играют циклы продолжительностью около 50 и 20 лет. Их общий вклад превышает 30 %, аналогичный вывод получен и для ряда других характеристик ледяного покрова (толщина льда, ледообмен и др.). В работе [9] показано, что продолжительность безледного периода имеет значимый цикл около 60 лет, который необходимо учитывать при климатических оценках.

Преобладающим фактором, определяющим короткопериодную межгодовую изменчивость безледного периода в этой части моря для большинства геологических структур, является степень суровости предшествующего холодного сезона (сумма градусо-дней мороза за предшествующий холодный период). Другие факторы, проявляющиеся в отдельные годы, могут нарушить зависимость продолжительности безледного периода от суммы градусо-дней мороза, что усложняет оценку сроков очищения и начала замерзания на конкретный сезон.

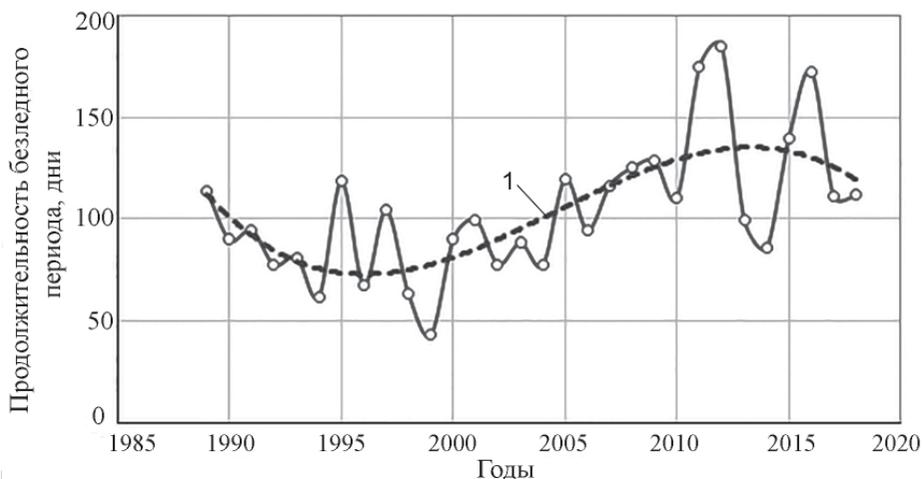


Рис. 3. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода с 1989 по 2018 г. в районе Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря.

1 — линия тренда, аппроксимация полиномом третьей степени

Fig. 3. Interannual variability of the ice-free period duration from 1989 to 2018 in the East Prinovozemelsky license block in the southwestern part of the Kara Sea.

1 — trend line, approximation by a third-degree polynomial

Кроме короткопериодных флуктуаций на интервале 30 лет выделяются два периода, средние значения и стандартные отклонения которых существенно отличаются. По аналогии с выделением двух временных интервалов по срокам очищения ото льда (рис. 2) для продолжительности безледного периода в качестве окончания первого временного интервала и начала второго были выбраны 2008 и 2009 гг., соответственно. Выделены 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) периоды. Эмпирическая кривая за 30 летний ряд также аппроксимирована полиномом третьей степени (рис. 3).

В последнее десятилетие продолжительность безледного периода существенно увеличилась по сравнению с предшествующим периодом. Его средние, экстремальные значения и стандартные отклонения для районов геологических структур приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние и экстремальные значения продолжительности безледного периода на акватории геологических структур Восточно-Приновоземельских лицензионных участков в юго-западной части Карского моря

Структуры	Продолжительность безледного периода за 20 лет (1989–2008 гг.), дни				Продолжительность безледного периода за последние 10 лет (2009–2018 гг.), дни				Увеличение продолжительности безледного периода за последние 10 лет, дни		
	минимум	средняя	максимум	СКО	минимум	средняя	поздняя	СКО	минимум	среднее	максимум
Рогозинская	42	84	126	22	75	123	180	37	33	39	54
Нансена	28	84	124	23	82	126	186	34	54	42	62
Университетская	59	88	127	23	89	134	192	36	30	46	65
Викуловская	16	86	130	29	88	140	202	42	72	54	72
Татариновская	44	96	149	30	90	146	210	42	46	49	61
Матусевича	48	98	155	29	86	135	199	38	38	38	44
Анабарская	65	97	141	17	82	122	152	26	17	24	11

В среднем продолжительность безледного периода за последние 10 лет, по сравнению с периодом за последние 20 лет, увеличилась более чем на один месяц. Увеличилось также и среднеквадратическое отклонение этой характеристики. Большая дисперсия продолжительности периода открытой воды, ее высокие значения в последнее десятилетие приводят к необходимости детального рассмотрения влияющих на него факторов и выделения нескольких сценарных условий, принципиальных для проведения поискового бурения.

Для каждой из структур может быть построена линейная регрессионная зависимость между числом градусо-дней мороза (ГДМ) на гидрометеорологической станции, расположенной на о. Белый, и продолжительностью операционного периода. Для четырех структур: Нансена, Университетская, Викуловская и Татариновская, где зависимость хорошо выражена ($R = 0,83–0,87$), можно разработать методику по определению даты очищения ото льда и даты начала замерзания, основываясь на учете данных по температуре воздуха за прошедший холодный сезон. Для оценки параме-

тров безледного периода в районе геологических структур Рогозинская, Матусевича и Анабарская, где связь менее четкая ($R = 0,70-0,75$), необходимо учитывать влияние и других факторов, рассмотренных выше, что выходит за рамки данной статьи.

СЦЕНАРИИ ОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ

Бурение с использованием неледостойкой передвижной платформы (СПБУ, ППБУ) ограничено наличием чистой воды на акватории, где производятся работы. Определяющими факторами при выборе сценария операционного периода являются продолжительность безледного периода, а также даты его начала и окончания. Примером подобной организации работ является поисково-разведочное бурение, выполненное ПАО «НК «Роснефть»» в Карском море в 2014 г. Бурение выполнялось с неледостойкой ППБУ «West Alpha» (рис. 4) в безледный период с июля по октябрь.



Рис. 4. ППБУ «West Alpha» в Карском море в 2014 г.

Fig. 4. «West Alpha» Floating Drilling Rig in the Kara Sea in 2014

Анализ продолжительности безледного периода за 10 последних лет (2009–2018 гг.) позволил выделить три типа периодов: короткий, средний и длительный. На основе таких же критериев было выделено количество таких типов за период 20 лет (1989–2008 гг.). Характеристики продолжительности трех типов операционного периода приведены в табл. 4.

В период с 1989 по 2008 г. длительных безледных периодов практически не было. Преобладали годы с короткими безледными периодами. В последнее десятилетие ледовые условия стали более благоприятными, стали чаще отмечаться средние и несколько реже длительные безледные периоды. Вероятность благоприятных условий в последнее десятилетие составляла около 80 %.

Основными вопросами с точки зрения ледовых условий при планировании поисково-разведочного бурения неледостойкой платформой на Восточно-Приновоземельских лицензионных участках являются: дата мобилизации буровой платформы к проливу Карские Ворота и продолжительность безледного периода в районе геологических структур. Продолжительность бурения и первоочередных испытаний скважины выбирается исходя из левой границы интервала операционного периода, а правая граница учитывается при планировании дополнительных испытаний скважины.

Несмотря на теоретическую возможность использования неледостойких платформ в коротком безледном периоде, максимальная эффективность достигается при

**Характеристики продолжительности трех типов операционного периода
для неледостойкой платформы на геологических структурах
за периоды 1989–2008 гг. и 2009–2018 гг.**

Характеристики	Периоды											
	короткий (<100 суток)				средний (100–150 суток)				длительный (>150 суток)			
	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит. дни	Средняя ГДМ
1989–2008 гг.												
Рогозинская	15	75	75	4165	5	25	109	3644	0	0	Нет*	Нет
Нансена	14	70	73	4194	6	30	109	3706	0	0	То же	То же
Университетская	13	65	74	4181	7	35	115	3799	0	0	“	“
Викуловская	12	60	68	4243	8	40	113	3755	0	0	“	“
Татариновская	10	50	72	4222	10	50	120	3873	0	0	“	“
Матусевича	11	55	76	4198	8	40	120	3881	1	5	155	3723
Анабарская	12	60	86	4059	8	40	114	1030	0	0	Нет	Нет
2009–2018 гг.												
Рогозинская	4	40	88	3471	3	30	120	3636	3	30	171	2779
Нансена	2	20	85	3511	5	50	116	3554	3	30	162	2779
Университетская	1	10	89	3717	6	60	118	3512	3	30	180	2779
Викуловская	2	20	88	3826	5	50	128	3428	3	30	194	2779
Татариновская	1	10	90	3717	5	50	122	3521	4	40	189	2952
Матусевича	2	20	92	3626	5	50	123	3508	3	30	185	2779
Анабарская	2	20	83	3626	7	70	128	3351	1	10	152	2418

Примечание. * — длительных безледных периодов (> 150 суток) не было.

длительном и среднем безледном периоде. В любом случае планирование работ должно базироваться на прогнозе даты окончательного очищения ото льда, при учете прогнозируемой продолжительности безледного периода. Имеется принципиальная возможность определения длительного сезона в начале мая, в тех случаях, когда сумма градусо-дней мороза по данным гидрометеорологических станций будет достаточно низкой. Неблагоприятный дрейф в течение лета не сможет существенно изменить дату окончательного очищения, так как из-за относительно малого объема льда процессы таяния будут преобладать над процессами дрейфа льда.

В случае короткого безледного периода (<100 суток) возможно строительство одной поисково-разведочной скважины, включая мобилизацию, непосредственно бурение и цементирование скважины, минимальный перечень геофизических и гидродинамических испытаний. В случае длительного безледного периода (>150 суток) появляется возможность строительства двух скважин за сезон. Данный выбор обусловлен ранним открытием структур ото льда и поздним их закрытием, что позволяет произвести работы на второй структуре. Бурение должно быть начато со структуры, для которой прогноз ледовых фаз наиболее благоприятный. При средней продолжительности безледного периода возможно планирование бурения как одной, так и двух скважин.

**СЦЕНАРИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ
ОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА ДЛЯ ЛЕДОСТОЙКОЙ ПЛАТФОРМЫ
ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ**

При использовании ледостойкой платформы появляется возможность расширения операционного периода за счет начала бурения непосредственно после понижения сплоченности льда до определенной градации в период таяния и окончания бурения после нарастания толщины льда до 30 см, которые были приняты пограничными условиями безопасной эксплуатации ледостойкой платформы. При этом возможны несколько вариантов расширения операционного периода в зависимости от выбранных дат начала и окончания операционного периода.

Для периода 2009–2018 гг. были определены даты наличия последнего сплоченного льда после начала процесса таяния и рассчитаны даты достижения льдом толщины 30 см в новый сезон замерзания. Статистические характеристики таких дат на акваториях геологических структур приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Статистические характеристики последних дат наличия сплоченного льда
и достижения льдом толщины 30 см**

Геологические структуры	Даты наблюдения наличия последнего сплоченного льда за период 2009–2018 гг.			СКО, дни	Даты достижения льдом толщины 30 см за период 2009–2018 гг.			СКО, дни
	ранняя	средняя	поздняя		ранняя	средняя	поздняя*	
Рогозинская	08.06.15	05.07	25.07.18	17	17.11.13	09.12	19.01.12	21
Нансена	10.06.12	05.07	01.08.17	17	17.11.14	13.12	08.01.12	17
Университетская	05.06.12	04.07	01.08.17	17	21.11.13	17.12	20.01.12	20
Викуловская	08.06.11	01.07	25.07.17	16	21.11.14	21.12	20.01.12	21
Татариновская	23.05.11	30.06	23.07.10	20	21.11.14	22.12	20.01.12	20
Матусевича	05.06.12	30.06	26.07.17	16	18.11.13	15.12	16.01.12	20
Анабарская	18.05.15	14.06	16.07.18	20	17.11.13	01.12	21.12.12	11

Примечание. * — нарастание толщины льда до 30 см в холодный сезон 2011–2012 гг. в районе большинства геологических структур произошло не в конце 2011 г., а в начале 2012 г.

При среднесезонных условиях в юго-западной части Карского моря преобладание сплоченного льда прекращается в период с середины июня до первых чисел июля. В следующем ледовом сезоне лед достигает толщины 30 см, в среднем, в течение декабря.

Сведения, приведенные в табл. 5, показывают, что раннее исчезновение сплоченного льда отмечалось в 2011, 2012 и 2015 гг., когда ледовые условия были аномально легкими. Позднее исчезновение сплоченного льда имело место в районе большинства геологических структур в 2017 и 2018 гг.

За последнее десятилетие самое раннее нарастание льда до 30 см на геологических структурах отмечалось в 2013 и 2014 гг., самое позднее на шести из семи рассмотренных геологических структур в ледовый сезон 2011–2012 гг., который характеризовался положительными аномалиями температуры воздуха. На станции Анабарская самое позднее появление льда с толщиной 30 см произошло тоже в 2012 г., но уже в сезон 2012–2013 гг., лед достиг толщины 30 см в декабре 2012 г.

В табл. 6 приведены характеристики операционного периода для ледостойкой платформы трех групп продолжительности, от последней даты сплоченного льда до

**Повторяемость, средняя продолжительность трех типов операционного периода
для ледостойкой платформы и средняя сумма градусо-дней мороза (ГДМ)
на геологических структурах для каждого типа за период 2009–2018 гг.**

Характеристики	Периоды											
	короткий (<140 дней)				средний (140–200 дней)				длительный (>200 дней)			
	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ	Количество лет	%	Средняя продолжит., дни	Средняя ГДМ
Рогозинская	5	50	130	3477	3	30	168	3400	2	20	210	2771
Нансена	2	20	125	3511	6	60	158	3482	2	20	206	2606
Университетская	2	20	133	3626	5	50	158	3508	3	30	210	2779
Викуловская	1	10	129	3717	6	60	157	3512	3	30	220	2779
Татариновская	2	20	136	3826	5	50	160	3428	3	30	226	2779
Матусевича	3	30	134	3519	5	50	169	3406	2	20	215	2771
Анабарская	2	20	135	3431	7	70	176	3306	1	10	201	3124

даты достижения льдом толщины 30 см. Критерии разделения на 3 типа приведены в шапке таблицы.

При таких критериях выбора продолжительности операционного периода больше половины случаев за последние 10 лет приходятся на средний период. Средняя продолжительность такого типа составляет около 160 дней. Короткий операционный период имел место в одном-двух случаях из десяти, исключение составили структуры Рогозинская и Матусевича, где короткий тип составил пять и три случая соответственно. Продолжительность такого типа операционного периода составила около 130 дней. Длительный тип операционного периода имел место лишь в 10–30 % случаев, продолжительность его составляла в среднем около 210 суток.

С учетом вышеизложенного, применение ледостойкой буровой платформы позволяет расширить сезон бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и практически гарантировать бурение двух скважин за сезон. При этом около трети времени работы будут производиться в ледовых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В межгодовой изменчивости продолжительности безледного периода выделяются 20-летний (1989–2008 гг.) и 10-летний (2009–2018 гг.) интервалы. В последнее десятилетие продолжительность и амплитуда безледного периода существенно увеличились по сравнению с предыдущим 20-летним периодом, в среднем более чем на месяц и составили 122–146 дней при СКО 14–26 дней в зависимости от положения геологической структуры.

Сроки очищения акватории ото льда и начала льдообразования на значительной площади акватории юго-западной части Карского моря во многом определяются одним и тем же фактором — суровостью предшествующего холодного сезона, который оценивается по сумме градусо-дней мороза.

Продолжительность безледного периода определяется гидрометеорологическими факторами за предшествующий зимний период (показатель — интегральная

отрицательная температура воздуха) и в летний период (показатели — дата очищения акватории ото льдов, температура воздуха, теплозапас моря). Для каждой из структур может быть построена линейная регрессионная зависимость между числом градусо-дней мороза и продолжительностью операционного периода.

Бурение с использованием неледостойкой буровой платформы ограничено наличием чистой воды на акватории, где производятся работы. Анализ продолжительности безледного периода позволил выделить три типа: короткий, средний и длительный периоды. При планировании поисково-разведочного бурения неледостойкой платформой основными параметрами являются: дата мобилизации буровой к проливу Карские Ворота и продолжительность безледного периода в районе геологических структур.

Бурение с использованием ледостойкой буровой платформы позволяет расширить операционный период, так как бурение можно начинать после исчезновения сплоченного льда, а завершать после нарастания толщины льда до 30 см. Анализ продолжительности операционного периода позволил выделить также три типа: короткий, средний и длительный периоды. Применение ледостойкой буровой платформы позволяет расширить сезон бурения на акватории Восточно-Приновоземельских лицензионных участков и практически гарантировать бурение двух скважин за сезон, при этом около трети времени работы будут производиться в ледовых условиях.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках инновационной программы ПАО «НК «Роснефть»».

Acknowledgements. The investigations were performed as a part of the innovative activity of Public joint-stock company “NK “Rosneft”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Изд. ГУНИО МО, 1980. 185 с.
2. Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей / Под ред. А.И. Данилова, Е.У. Миронова, В.А. Спичкина. СПб.: ААНИИ, 2004. 320 с.
3. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики: обобщение фондовых материалов и результаты экспедиционных исследований ООО «АНПЦ» в 2012–2014 гг. / Под ред. В.А. Павлова, О.А. Вербицкой, Е.У. Миронова, П.А. Тарасова, К.А. Корнишина. М.: «Нефтяное хозяйство», 2015. 128 с.
4. Егоров А.Г., Спичкин В.А. Метод локально-генетической типизации ледовых условий // Труды ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 146–163.
5. Спичкин В.А. Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в морях сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 1987. Т. 402. С. 81–92.
6. Егоров А.Г. Долгосрочный прогноз количества и распределения сплоченных льдов в море Лаптевых в летний период // Информационный сборник ГМЦ РФ «Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов». 2002. № 29. С. 120–136.
7. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
8. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа // Научные исследования в Арктике. Т. 2. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
9. Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В. Оценка перспектив навигации по Северному морскому пути на основе комбинированного прогностического сценария // Труды ГОИН. 2018. Вып. 219. С. 249–268.

REFERENCES

1. *Atlas okeanov. Severniy Ledovitiy ocean*. Atlas of the oceans. Arctic Ocean. Moscow: Naval Administration, Ministry of Defence Publ., 1980: 185 p. [In Russian].
2. *Izmenchivost prirodnykh usloviy v shelfovoy zone Barentseva i Karskogo morey*. Variability of the natural conditions in the shelf zone of the Barents and Kara Seas. Ed. A.I. Danilov, E.U. Mironov, V.A. Spichkin. St. Petersburg: AARI, 2004: 320 p. [In Russian].
3. *Atlas gidrometeorologicheskikh i ledoviykh usloviy morey rossiyskoy Arctiki: obobshchenie fondoviykh materialov i rezultati ekspeditsionnykh issledovaniy OOO "ANPC" v 2012–2014 gg.* Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic: generalization of stock materials and the results of the expeditionary research of Ltd "ANPC" in 2012–2014. Ed. V.A. Pavlov, O.A. Verbitskaya, E.U. Mironov, P.A. Tarasov, K.A. Kornishin. Moscow: "Neftianoe Hoziaystvo" pub., 2015: 128 p. [In Russian].
4. *Egorov A.G., Spichkin V.A.* The method of local genetic typification of ice conditions. *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1994, 432: 146–163. [In Russian].
5. *Spichkin V.A.* The main natural factors that determine the anomalies of the timing of the beginning of ice formation in the seas of the Siberian shelf. *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI, 1987, 402: 81–92. [In Russian].
6. *Egorov A.G.* Long-term forecast of the quantity and distribution of cohesive ice in the Laptev Sea in the summer. *Informatsionniy sbornik GMTS RF. "Rezultati ispitaniy noviy i usovershenstvovaniykh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov"*. Information collection of the RF GMC "Results of testing new and improved methods of hydrometeorological forecasts". 2002, 29: 120–136. [In Russian].
7. *Monin A.C.* *Prognoz pogodi kak zadacha fiziki*. Weather forecast as a physics problem. Moscow: Nauka, 1969: 184 p. [In Russian].
8. *Frolov I.E., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E., Smolyanitsky V.* *Nauchnyye issledovaniya v Arktike. T. 2. Klimaticheskie izmeneniya ledyanogo pokrova morey Evraziyskogo shel'fa*. Scientific research in the Arctic. V. 2. Climate Change of ice cover extent in Eurasian Arctic Shelf Seas. St. Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
9. *Dianskiy N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V.* Evaluation of the prospects for navigating the Northern Sea Route based on a combined prognostic scenario. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. Proc. SOI. 2018, 219: 249–268 p. [In Russian].